

ANA LUIZA ALVES DE OLIVEIRA

MATRÍCULA: 21129284

**A INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO**

**Brasília
2014**

ANA LUIZA ALVES DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a conclusão
do curso de Engenharia Civil do UniCEUB
- Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.^a Civil Irene de Azevedo
Lima Joffily, M.Sc.

**Brasília
2014**

ANA LUIZA ALVES DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a conclusão
do curso de Engenharia Civil do UniCEUB
- Centro Universitário de Brasília

Orientadora: Prof.^a Irene de Azevedo
Lima Joffily, M.Sc.

Brasília, 04 de Dezembro de 2014.

Banca Examinadora

Eng^a. Civil: Irene de Azevedo Lima Joffily, M.Sc.
Orientadora

Eng^o. Civil: Jorge Antonio da Cunha Oliveira, D.Sc.
Examinador Interno

Eng^a. Civil: Maria del Pilar Guzman Palacios, M.Sc.
Examinadora Externa

À Deus, o maior de todos os engenheiros.

Aos meus pais, Rosânia e Edilson, pelo carinho,
amor e apoio incondicional.

Ao meu irmão, Vinícius, pela torcida, ainda
que as vezes silenciosa.

Ao João, por me encorajar quando eu desanimava
e ter fé em mim quando ela me faltava.

AGRADECIMENTOS

À Irene Joffily, minha professora e orientadora, que além de ajudar ativamente na minha formação acadêmica, também contribuiu com minha formação profissional. Admiro-a verdadeiramente.

Aos laboratoristas Vanilson, Dida e Régis (Salvador), pelo apoio, paciência e bom humor. Com certeza, sem vocês esse trabalho não seria possível.

À minha família, pela torcida e motivação.

Aos amigos, por escutar meus desabafos e angústias e comemorar vitórias e conquistas ao longo desses anos.

Aos colegas de sala, por compartilharem os momentos de desespero e de descontração.

À Andressa, pelo companheirismo nas aulas, trabalhos e vida pessoal.

Aos professores do UniCEUB, pelo apoio e conhecimento adquirido.

Ao UniCEUB, por fornecer a estrutura laboratorial necessária ao desenvolvimento dos ensaios desse trabalho

À empresa Viapol, por ceder o cristalizante utilizado nesse trabalho.

À Concrecon, por conceder o material utilizado.

À todos, que de alguma forma contribuíram com essa minha jornada, muito obrigada!

RESUMO

O concreto é o segundo material mais consumido pelo homem no mundo, perdendo apenas para a água, sendo que atualmente o seu consumo é da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. A sua resistência à água, plasticidade e baixo custo são fatores determinantes para essa utilização em larga escala. Atualmente, praticamente todo concreto apresenta algum tipo de aditivo em sua composição, com uma função específica, podendo até mesmo ser utilizado mais de um tipo de aditivo. Por isso sua produção deve ser muito bem feita e fiscalizada, uma vez que diversos fatores como a temperatura, a maneira que ele foi fabricado e as características dos seus componentes influenciam nas suas propriedades. O aditivo cristalizante é um dos vários existentes no mercado atualmente e, a partir de reações químicas ele forma pequenos cristais que preenchem os poros do concreto, reduzindo a sua permeabilidade e aumentando a proteção, durabilidade e vida útil das estruturas da construção civil. Apesar desse aditivo ser bastante utilizado atualmente, muitas obras o fazem sem verificar se existe um impacto negativo sobre as propriedades do concreto. Levando esse fato em consideração, esse estudo visa comparar o concreto com e sem aditivo cristalizante redutor de permeabilidade, por meio de ensaios e assim, verificar as suas propriedades no estado fresco (com o tempo de pega e abatimento) e endurecido (resistência à tração, compressão, absorção de água e permeabilidade), utilizando dois tipos de cimento: CP III e CP V. O estudo verificou uma melhor compatibilidade do aditivo cristalizante com o cimento CP III, que resultou em aumento de resistência e diminuição da absorção. Porém, reduziu o abatimento de forma significativa.

Palavras-chave: Cristalizante, aditivos, concreto, impermeabilização.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TUBULAÇÃO DO PROJETO CENTRAL ARIZONA.....	12
FIGURA 2: EVOLUÇÃO DO ADITIVO CRISTALIZANTE NO CONCRETO.....	23
FIGURA 3: COLMATAÇÃO DA FISSURA EM CONCRETO TRATADO (A) E NÃO TRATADO (B).....	24
FIGURA 4: ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO ALEGRIA.....	24
FIGURA 5: STADIUM AUSTRALIA	25
FIGURA 6: FÁBRICA GENERAL MOTORS	25
FIGURA 7: CONE DE ABRAMS	27
FIGURA 8: TESTE DE ABATIMENTO.....	27
FIGURA 9: DISTRIBUIÇÃO NORMAL PARA A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	32
FIGURA 10: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.	33
FIGURA 11: ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	34
FIGURA 12: ILUSTRAÇÃO DO EXPERIMENTO DO PRISMA	35
FIGURA 13: AREIAS UTILIZADAS NO ENSAIO	38
FIGURA 13: MISTURADOR MECÂNICO	39
FIGURA 14: CORPOS-DE-PROVA DE CIMENTO	40
FIGURA 15: APARELHO DE VICAT	42
FIGURA 16: CONJUNTO COMPLETO DE PENEIRAS UTILIZADO E PARTE DELE NO MISTURADOR MECÂNICO.....	44
FIGURA 17: ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA PELO MÉTODO DE CHAPMAN	47
FIGURA 18: COMPONENTES DO CONCRETO SEPARADOS.....	49
FIGURA 19: BETONEIRA UTILIZADA	50
FIGURA 20: MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO	51
FIGURA 21: AMOSTRAS CILÍNDRICAS COBERTAS COM PANO ÚMIDO	52
FIGURA 22: UTILIZAÇÃO DO PENETRÔMETRO DE BOLSO	53
FIGURA 23: ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	54
FIGURA 24: CORPOS-DE-PROVA UTILIZADOS.....	55
FIGURA 25: CORPOS-DE-PROVA NA BALANÇA HIDROSTÁTICA	56
FIGURA 26: CACHIMBO DE PERMEABILIDADE.....	57
FIGURA 28: IMAGENS TERMOGRÁFICAS DOS CONCRETOS	67
FIGURA 29: IMAGENS DOS CONCRETOS SEM TERMOGRAFIA	67

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 1: TIPOS DE CIMENTO PORTLAND NORMALIZADOS NO BRASIL.....	16
QUADRO 2: ABATIMENTO RECOMENDADO PARA DIFERENTES TIPOS DE APLICAÇÕES.....	28
QUADRO 3: QUANTIDADE UTILIZADA DE MATERIAL.....	38
QUADRO 4: RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS CP III E CP V.....	40
QUADRO 5: TEMPOS DE PEGA AFERIDOS E EXIGIDOS PELA NORMA DOS CIMENTOS.....	43
QUADRO 6: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	44
QUADRO 7: MASSA ESPECÍFICA DA AREIA CAVA.....	47
QUADRO 8: NOMENCLATURAS E VARIÁVEIS DE TRABALHO.....	48
QUADRO 9: TRAÇO DO CONCRETO.....	48
QUADRO 10: PARÂMETROS DE MISTURA.....	50
QUADRO 11: ENSAIOS REALIZADOS.....	51
QUADRO 12: ABATIMENTOS DOS CONCRETOS.....	59
QUADRO 13: RESULTADOS DO TEMPO DE PEGA DO CONCRETO.....	60
QUADRO 14: TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DO CONCRETO.....	61
QUADRO 15: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS.....	62
QUADRO 16: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	63
QUADRO 17: ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSAS ESPECÍFICAS.....	65
QUADRO 18: RESULTADOS DA PERMEABILIDADE PELO MÉTODO DO CACHIMBO.....	65
QUADRO 19: QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS.....	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: RESULTADOS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS CP III E CP V	41
GRÁFICO 2: CURVA GRANULOMÉTRICA – AREIA CAVA.....	45
GRÁFICO 3: CURVA GRANULOMÉTRICA - AREIA ARTIFICIAL	45
GRÁFICO 4: CURVA GRANULOMÉTRICA - BRITA1	46
GRÁFICO 5: TEMPO DE INÍCIO DE PEGA DO CONCRETO	61
GRÁFICO 6: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	62
GRÁFICO 7: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CONCRETOS.....	64
GRÁFICO 8: PERMEABILIDADE DOS CONCRETOS	66

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

°C	Graus célsius
a/c	Relação água/cimento
α %	Teor de argamassa
A %	Fator água/mistura seca
AA	Areia artificial
AR	Areia cava
B1	Brita 1
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
cp's	Corpos-de-prova
C ₃ S	Silicato tricálcico
g.....	Gramas
MPa	Mega-pascal
m.c.a	Metro de coluna d'água
mm	Milímetro
mL	Mililitro
R ²	Coeficiente de correlação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivos do trabalho.....	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 Hipótese.....	13
1.3 Justificativas.....	13
1.4 Estrutura do trabalho	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 O Concreto.....	15
2.1.1 Cimento Portland	15
2.1.2 Agregados	18
2.1.3 Água	20
2.1.4 Aditivos.....	21
2.1.5 Aditivo Cristalizante.....	22
2.2 Propriedades do Concreto Fresco	26
2.2.1 Consistência	26
2.2.2 Plasticidade	28
2.2.3 Poder de Retenção da Água	29
2.2.4 Trabalhabilidade	29
2.3 Propriedades do Concreto Endurecido	30
2.3.1 Resistência Mecânica.....	30
2.3.2 Durabilidade e Permeabilidade.....	31
2.4 Ensaios de Caracterização do Concreto	32
2.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão	32
2.4.2 Ensaio de Resistência à Tração do Concreto por Compressão Diametral	33
2.4.3 Ensaio de Tempo de Pega do Concreto pela Resistência à Penetração	34
2.4.4 Ensaio de Absorção de Água do Concreto	35
2.4.5 Imagens Termográficas.....	35
3. METODOLOGIA.....	37
3.1 Caracterização do Material	37
3.1.1 Cimento	37
3.1.2 Agregados	43
3.2 Concretos.....	48
3.2.1 Tempo de Início de Pega do Concreto	52
3.2.2 Resistência à Compressão	53
3.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	54
3.2.4 Absorção, Índice de Vazios e Massa Específicas	55
3.2.5 Permeabilidade pelo Método do Cachimbo	57
3.2.6 Imagens termográficas	58

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1 Ensaio no Estado Fresco	59
4.1.2 Ensaio de Abatimento.....	59
4.1.3 Tempo de Início Pega.....	60
4.2 Ensaio no Estado Endurecido.....	62
4.2.1 Resistência à Compressão	62
4.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	63
4.2.3 Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica	64
4.2.4 Permeabilidade pelo Método do Cachimbo	65
4.2.5 Imagens Termográficas.....	66
4.3 Resumo dos resultados obtidos	68
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
5.1 Conclusões.....	69
5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

Em 1964, em um artigo publicado pela *Scientific American*, Brunauer e Copeland, dois cientistas no campo do cimento e concreto escreveram:

O material de construção mais utilizado é o concreto, comumente composto da mistura de cimento Portland com areia, brita e água. No ano passado, nos Estados Unidos, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foram convertidos em 500 milhões de toneladas de concreto, cinco vezes o consumo em peso do aço. [...] O consumo mundial total de concreto no ano passado foi estimado em três bilhões de toneladas, ou seja, uma tonelada para cada ser humano vivo. Não há material mais consumido pelo homem, com exceção da água.

Atualmente, devido ao desenvolvimento mundial e ao crescimento populacional, o consumo desse material é muito maior que 50 anos atrás. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) “o consumo atual de concreto no mundo é da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano.”

Essa grande quantidade utilizada desse material é justificada devido principalmente à três de suas propriedades:

- Sua resistência à água, o que é um grande diferencial em relação ao aço;
- Sua plasticidade no estado fresco, o que permite elementos estruturais de diferentes tamanhos e formas;
- Baixo custo e disponibilidade do material.

Todas essas características permitiram a produção de obras antes inimagináveis, como a da Figura 1 que, segundo com Mehta e Monteiro (2008), apresenta uma tubulação de 6,4 m de diâmetro interno e 7,5 m de diâmetro externo, feita de concreto pré-moldado para o transporte de água do projeto Central Arizona. Esse empreendimento custou U\$ 1,2 bilhões e fornece água do Rio Colorado para cidades e usinas de Arizona, nos Estados Unidos da América.

Figura 1: Tubulação do projeto Central Arizona



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Apesar da sua larga utilização, o concreto ainda surpreende e poder vir a ter reações inesperadas. Por isso a sua qualidade deve ser controlada e assegurada. Essa qualidade do concreto depende de inúmeras variáveis, tais como a temperatura, a maneira que ele foi fabricado, as características dos seus materiais, entre outros.

Uma forma de aumentar a sua qualidade é através do acréscimo de aditivos, que atualmente podem ser considerados um quinto elemento da sua composição, já que são muito utilizados. Um dos vários aditivos existentes é o cristalizante, que forma cristais que preenchem os poros do concreto deixando-o impermeável e, conseqüentemente, aumentando a sua vida útil.

1.1 Objetivos do trabalho

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral comparar o concreto com e sem aditivo cristalizante redutor de permeabilidade por meio das propriedades no estado fresco (tempo de pega e abatimento) e endurecido (resistência à tração, compressão, absorção de água e permeabilidade), utilizando os cimentos CP III e CP V.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, buscou-se:

- Determinar se o tipo de cimento influencia no tempo de início de pega, quando adicionado o cristalizante;
- Avaliar o ganho na impermeabilidade e redução na porosidade do concreto com cristalizante;
- Verificar se o cristalizante proporciona um aumento na resistência à compressão e à tração do concreto;
- Identificar a influência do tipo de cimentos nas propriedades analisadas.

1.2 Hipótese

Acredita-se que os aditivos cristalizantes não afetam a trabalhabilidade do concreto fresco e, devido ao fato de o aditivo utilizado reagir com a água do concreto e com subprodutos do cimento gerando compostos cristalinos insolúveis em seus poros, e resultará em uma redução da permeabilidade do concreto e um ganho na resistência à compressão e, conseqüentemente, será um concreto mais durável.

1.3 Justificativas

Esse estudo se faz necessário pois:

- Busca quantificar os ganhos ao se utilizar um aditivo cristalizante no concreto, sem alterar as suas propriedades no estado fresco, resultando em um concreto com maior durabilidade;
- Muitas obras têm utilizado os aditivos cristalizantes sem verificar se existe impacto negativo sobre o mesmo, o que pode resultar em problemas futuros caso exista alguma incompatibilidade do aditivo com os materiais utilizados;
- Os concretos com cristalizantes terão menor permeabilidade, portanto dificultam a entrada de agentes agressivos, evitando a corrosão da armadura e aumentando a vida útil das estruturas de concreto armado.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, sendo esse o primeiro deles, que contempla a introdução, os objetivos do trabalho e as suas justificativas. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente aos temas pertinentes, como cimento, concreto e aditivos.

O terceiro apresenta a metodologia utilizada, mostrando os procedimentos e ensaios realizados tanto para caracterizar os materiais, quanto para avaliar o concreto em si. No quarto, há apresentação dos resultados encontrados e uma análise deles.

Enfim, o quinto e último capítulo apresenta as considerações finais, as principais conclusões e sugestão para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Concreto

O concreto é um material formado essencialmente de um meio aglomerante, geralmente o cimento hidráulico e a água, e dos agregados, usualmente areia e brita. Atualmente, pode-se dizer que existe um quinto componente, que seria o aditivo. Com uma massa específica compreendida entre 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³, o concreto é bastante utilizado mundialmente. A seguir, mais será explicitado sobre seus componentes.

2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material bastante versátil, sendo utilizado em grande escala no mundo todo. De acordo com Battagin (2011) os primeiros passos para o surgimento do cimento foram dados pelos babilônios e assírios, que utilizavam argilas não cozidas misturadas com fibras vegetais para a elaboração de suas moradias. Os egípcios, visando construir suas suntuosas pirâmides, introduziram argamassas de cal e gesso. Por fim, os romanos produziram um cimento com grande durabilidade a base de cinzas vulcânicas, argamassa de argila e cal, construindo archedutos e portos que resistiram ao tempo.

Porém foi apenas em 1824 que Joseph Aspdin, construtor inglês, queimou conjuntamente a altas temperaturas (aproximadamente 1450°C) pedras calcárias e argila finamente moídas. Dessa maneira, criou-se o clínquer, produto que é componente do cimento até os dias atuais. Após moer novamente o clínquer, um pó fino foi obtido. Aspdin percebeu que ao endurecer, esse produto continuava resistente e que não se dissolvia na água. Então, ele foi batizado de cimento Portland, por apresentar cor e propriedades semelhantes às rochas da ilha britânica Portland.

ANBR 5732 (ABNT, 1991) define cimento Portland como:

Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem, é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

Battagin (2011) afirma que atualmente no Brasil, existem basicamente oito tipos básicos normalizados de cimento Portland. Se forem considerados os seus subtipos e derivações, pode-se dizer que há mais de vinte tipos existentes. O cimento Portland comum (CP I), embora seja escasso comercialmente devido a questões ambientais, é a referência para todos os outros tipos básicos de cimento por ter sido o primeiro a produzido, a partir de 1926.

Esses tipos se diferenciam de acordo com as suas características e com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, além de produtos que podem ser adicionados no processo de moagem, como a escória, pozolana e filler calcário.

O Quadro 1 a seguir apresenta os tipos de cimentos normalizados no Brasil, com suas respectivas classes de resistência em MPa e componentes.

Quadro 1: Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classe	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clinquer + gesso	Escória	Pozolana	Filler Calcário
Comum	CPI	25,32,40	100	0	0	0
Comum com adição	CPI-S	25,32,40	99-95	1-5	1-5	1-5
Composto com Escória	CPII-E	25,32,40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	--	100-95	0	0	0-5
Resistente à Sulfatos	RS	25,32,40	(*)			
Baixo calor de Hidratação	BC	25,32,40				
Branco Estrutural	CPB	25,32,40	--	--	--	--

(*) A composição depende do tipo original do qual é derivado.

** Outro tipo de cimento branco também é produzido: Cimento Portland Branco Não Estrutural (CPB).

Fonte: Battagin, 2011

Cada um desses cimentos é usado para uma certa aplicação no Brasil, como é exposto abaixo conforme Kihara e Centurione (2005):

- CPI e CPI-S: é utilizado em serviços de construção em geral, sempre que não sejam exigidas propriedades especiais. Não deve ser utilizada em locais com sulfatos no solo ou em águas subterrâneas;

- CII-Z: por liberar calor de hidratação mais lentamente que o CI, é recomendado para concretagens de grande volume. Esse cimento também apresenta melhor resistência ao ataque de sulfatos do solo. O concreto proveniente deste cimento é mais impermeável;
- CII-E: é um cimento intermediário ao CI e o CIII, sendo recomendado para peças que necessitem de um desprendimento de calor moderado ou que possam ser atacadas por sulfatos;
- CII-F: utilizado para aplicações gerais como argamassas de assentamento, revestimento, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, concreto-massa, entre outros;
- CIII: apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além do baixo calor de hidratação e alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente aos sulfatos. Sua aplicação é geral: argamassas de assentamento, revestimento, concreto simples, armado, protendido, projetado, rolado, entre outras. Também é recomendado para concreto-massa, obras em ambientes agressivos, concretos com agregados reativos, pistas de aeroportos, entre outras. Devido ao endurecimento mais lento, necessita de maior tempo de cura.
- CIV: possui menores resistências nas primeiras idades. Mas a resistência final é, em geral, maior. Devido à menor velocidade de reações de hidratação do cimento, libera energia lentamente. Logo, é recomendado para construção de barragens e outras estruturas maciças de concreto. O concreto produzido apresenta menor porosidade, sendo, então, mais durável.
- CV-ARI: cimento de alta resistência obtido devido ao aumento de C_3S (silicato tricálcico) na sua composição e pela moagem mais fina. Desprende maior calor de hidratação que o cimento Portland comum, tornando o concreto mais suscetível a fissuração. É recomendado em casos em que for preciso a desforma rápida ou para liberação rápida de um serviço, sendo muito utilizado na indústria de pré-moldados.

- CP RS: apresenta resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgoto, água do mar e alguns tipos de solos. Assim, podem ser utilizados em estações de tratamento de esgoto, regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas. Cinco tipos básicos de cimento podem ser resistentes ao sulfato: CP I, CP II, CP III, CP IV e CPV.
- CP BC: cimento de baixo calor de hidratação, e que tem a propriedade de retardar a liberação de calor em peças de grande volume, evitando o aparecimento de fissuras de origens térmicas.
- CP B: o cimento branco é classificado em dois subtipos: o estrutural e não-estrutural. O estrutural é aplicado com fins arquitetônicos e o não-estrutural em rejuntamento e em aplicações não estruturais.

2.1.2 Agregados

De acordo com Neto (2011) no fim do século XIX e início do século XX, acreditava-se que os agregados possuíam um papel secundário na produção do concreto, servindo apenas para preenchimento e barateamento do produto final. Como naquele período era abundante a quantidade desses materiais, e a sua qualidade era boa, tornava-se fácil acreditar que a sua função era apenas auxiliar.

Porém, com a utilização do concreto em larga escala no decorrer do século XX, sua real importância técnica, social e econômica foi revelada. Fatores como o esgotamento das fontes desse material em locais próximos, o aumento no custo dos transportes, a conscientização da sociedade com criação de leis para proteção do meio ambiente e o acirramento da concorrência comercial entre produtores contribuíram para um maior entendimento dessa questão.

A partir dos anos 50 a seleção inadequada dos agregados geraram problemas técnicos e econômicos, como por exemplo barragens de concreto que foram praticamente reconstruídas, evidenciaram a necessidade de um conhecimento mais profundo sobre esses materiais.

Várias das propriedades do concreto são influenciadas pelos agregados, como: absorção d'água, porosidade, estabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, etc. Quando esse fato passou a ser conhecido, o cuidado na seleção dos agregados passou a ser maior. O aumento do uso de concretos auto adensáveis nos últimos anos coloca em evidência que os agregados, principalmente os finos, tem na qualidade do concreto.

De acordo com Neto (2011), agregado é: “material granular, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em particular ao fabrico de concreto e argamassas de cimento Portland”. Eles podem ser definidos quanto à: origem, massa unitária e dimensão dos grãos.

➤ **Quanto à sua origem, eles podem ser:**

- **Naturais:** encontrados na natureza já preparados para o uso, podendo ser submetida apenas à lavagem. Exemplos: areia de rio, pedregulho, areia cava, etc.;
- **Britados:** sofrem processo de cominuição, geralmente por britagem, para se adequar ao uso de agregado no concreto. Exemplos: pedra britada, pedrisco, pedregulho britado, etc.;
- **Artificiais:** proveniente de processos industriais. Exemplos: argila expandida, vermiculita expandida, folhelho expandido por tratamento térmico, etc.;
- **Reciclados:** podem ser derivados de resíduos industriais ou de entulhos de construção ou demolição, desde que sejam apropriados para executar a função de agregado do concreto. Exemplos: escória de alto-forno, etc.;

➤ **Quanto à massa unitária:**

- **Normais:** são a maioria dos agregados naturais e possuem massa unitária ente 1500 e 1700 kg/m³, tais como areia e pedregulho, e produzem os concretos normais com cerca de 2400 kg/m³;
- **Leves:** usados na produção dos concretos leves, que podem atingir a massa específica de 500 kg/m³. Exemplos: os produzidos a partir da expansão térmica da argila, como escória, vermiculita, ardósia e resíduo de esgoto.

- **Pesados:** usados na produção dos concretos leves, sua massa específica deve ser superior a 2800 kg/m³. Exemplos: barita, hematita e limonita.

➤ **Quanto dimensão dos grãos:**

- **Agregado graúdo:** é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 152 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm.
- **Agregado miúdo:** é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 0,075 mm.

Os agregados usados na produção do concreto, no geral, possuem resistência mecânica maior que a do próprio concreto.

2.1.3 Água

A água é presença obrigatória em todos os aspectos da civilização humana, desde a sua higiene e alimentação até os processos industriais. Esse fato não poderia ser diferente na produção do concreto, sendo ela o componente que lhe confere as propriedades requeridas para ele ter resistência e durabilidade, já que influencia diretamente no fator água/cimento.

Isaia (2011) diz que, no concreto fresco, “a água é o agente que promove a diminuição do atrito por meio da película envolvente aos grãos, promovendo a aglutinação do agregado por intermédio da pasta de cimento”. Dessa maneira, a água é a responsável por possibilitar que, no estado plástico, o concreto possa ser produzido, transportado e colocado nas fôrmas devido à sua trabalhabilidade, sem que o ele sofra segregação.

A existência de substâncias suspensas ou diluídas na água podem alterar o início e o fim do seu tempo de pega. Por isso a necessidade de se utilizar um líquido em boas condições. Ademais, o acréscimo da água é o meio mais efetivo para prevenir a fissuração prematura nas primeiras idades, através da cura.

A saturação da superfície do concreto previne a difusão desse fluido do interior para o meio ambiente, prevenindo a retração plástica e a fluência do concreto, além de fornecer à pasta o tempo necessário para resistir aos esforços de tração exigidos da estrutura.

2.1.4 Aditivos

Como já foi explanado, atualmente, os aditivos podem ser considerados um quinto elemento da composição do concreto, devido à sua grande utilização. A NBR 11768 (ABNT, 1992) define o aditivo como “produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

Ainda segundo a mesma norma, os aditivos podem ser classificados da seguinte forma:

- **Plastificante (tipo P):** possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um certo concreto com determinada consistência;
- **Retardador (tipo R):** aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto;
- **Acelerador (tipo A):** diminui os tempos de início e fim de pega do concreto e acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais;
- **Plastificante retardador (tipo PR):** combina os efeitos dos aditivos plastificantes e retardador;
- **Plastificante acelerador (tipo PA):** combina os efeitos dos aditivos plastificantes e acelerador;
- **Aditivo incorporador de ar (tipo IAR):** incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto;
- **Aditivo superplastificante (tipo SP):** possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento para produzir um certo concreto com determinada consistência;

- **Aditivo superplastificante retardador (tipo SPR):** combina os efeitos dos aditivos superplastificantes e retardador;
- **Aditivo superplastificante acelerador (tipo SPA):** combina os efeitos dos aditivos superplastificantes e acelerador;

2.1.5 Aditivo Cristalizante

São vários os produtos existentes que visam a impermeabilização e proteção das estruturas da construção civil para aumentar a durabilidade e vida útil de uma estrutura. Atualmente, no Brasil, o produto mais conhecido e utilizado são as mantas asfálticas, mas também existem diversos outros como as argamassas poliméricas, asfaltos elastoméricos, poliuréias, poliuretanos etc.

Diversos fatores podem comprometer o desempenho desses materiais como, por exemplo, o intemperismo, a deterioração pelos agentes presentes na água armazenada ou no lençol freático, a mão de obra desqualificada etc. (OUVIRE; BOLESKY, 2008).

Um produto existente no mercado com o objetivo de impermeabilizar e preservar os elementos de concreto armado de uma obra são os aditivos cristalizantes. Ainda segundo os mesmos autores, esse produto funciona da seguinte forma: “uma vez dentro do concreto, os compostos químicos reagem com a água, hidróxido de cálcio e alumínio como também com vários outros óxidos metálicos e sais existentes no concreto, crescendo no interior dos poros e capilares do concreto”. Assim, através de reações bastante complexas, esses cristais são formados tornando-se parte integrante do concreto. Alguns fabricantes recomendam que o consumo do cristalizante, para que ele reaja da maneira correta, deve ser de 3% a 4% sobre o peso do cimento.

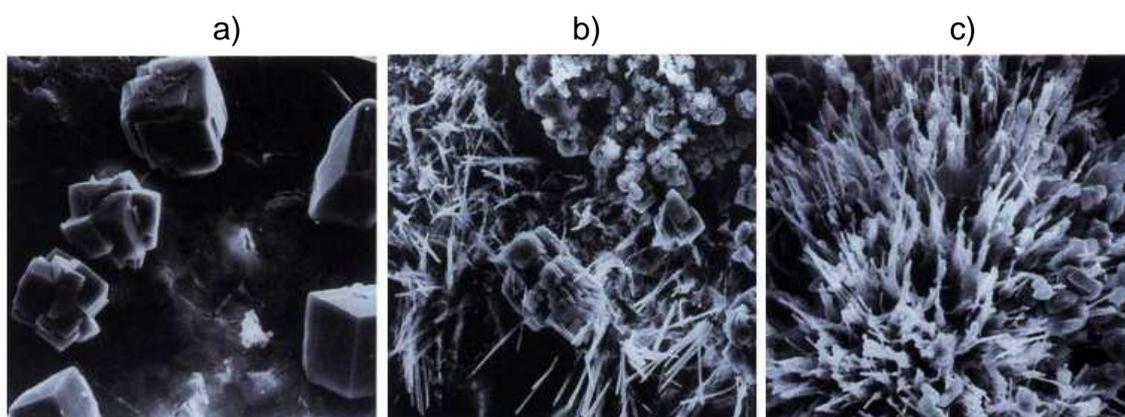
Vale ressaltar que na ausência da água, esses cristais ficam adormecidos mas, por serem catalíticos, ao entrar em contato com o líquido eles voltam a crescer, protegendo o concreto. Portanto, para que o aditivo reaja e tenha o efeito desejado, que é proteger a estrutura da água, ela é necessária. Esse é um processo que ocorre com o tempo e, portanto, com o passar dele a sua eficiência vai aumentando.

Segundo Takagi, Júnior e Oliveira (2004), esse tratamento químico não é tóxico e não compromete a potabilidade da água e dos lençóis freáticos. Ele faz com que a estrutura suporte pressões hidrostáticas positivas e negativas de até 71,4 m.c.a. e resista ao ataque de substâncias químicas com pH de 3,0 a 11,0 nos meios em que estarão em contato permanentemente. Porém, por ser um produto rígido, possui algumas restrições, uma vez que se existirem fissuras ativas a impermeabilização se torna ineficiente.

A Figura 2 mostra o processo de formação de cristais provocado por esse aditivo através de fotos de microscopia eletrônica por varredura, tiradas por laboratórios de pesquisa independentes. Para essas fotos, um corpo-de-prova de concreto foi seccionado a 50 mm da superfície.

A Figura 2a representa o concreto não tratado, e é possível ver precipitações de cristais de hidróxido de cálcio junto com partículas cúbicas e rômbica. A Figura 2b mostra o início da formação dos cristais após a aplicação do tratamento químico na superfície. Já 2c exibe a foto dos cristais após 26 dias da aplicação. Observa-se que cristais densos foram formados nos poros e capilaridades do concreto, protegendo-o da passagem de fluidos e de substâncias agressivas.

Figura 2: Evolução do aditivo cristalizante no concreto

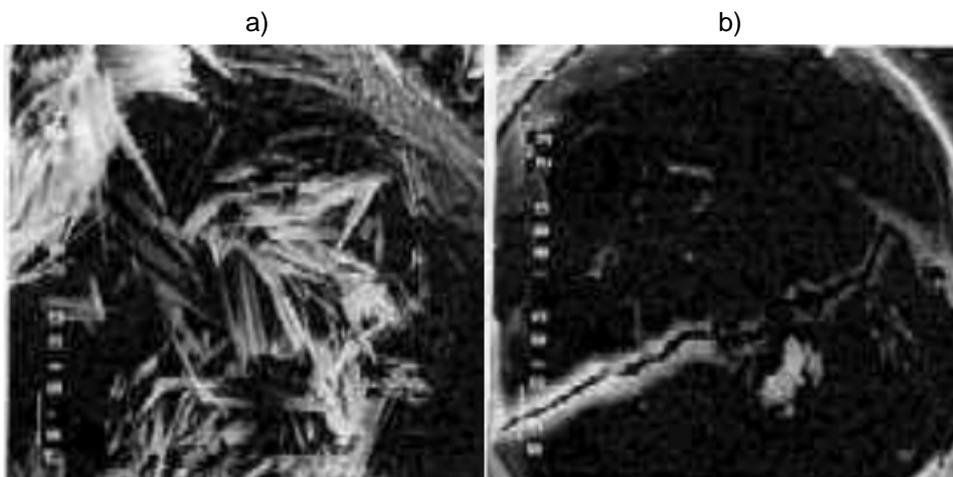


Fonte: Takagi, Júnior e Oliveira (2004)

Esse cristalizante possui ainda a capacidade de colmatagem das fissuras, ou seja, caso elas sejam passivas e de até 0,4 mm, cristais se formarão naquele vazio e eles o preencherão.

Caso contrário as fissuras não serão seladas, por isso, diz-se que o cristalizante é um tratamento impermeabilizante rígido. Essa é a principal desvantagem desse aditivo. Portanto, ele não pode ser usado em estruturas que se deformam, como lajes. A Figura 3 abaixo mostra fotos microscópicas com o aumento de mil vezes da colmatação. A Figura 3a exibe o crescimento de cristais no interior da fissura do concreto tratado, e a 3b apresenta apenas as paredes de gel de cimento no concreto sem o tratamento.

Figura 3: Colmatação da fissura em concreto tratado (a) e não tratado (b).



Fonte: Takagi, Júnior e Oliveira (2004)

Diversas obras no mundo já utilizaram esse tratamento. A seguir, serão expostos alguns exemplos.

A Estação de Tratamento de Esgoto Alegria, localizada no Rio de Janeiro, que utilizou 35.000 m² do tratamento químico cristalizante por pintura (Figura 4).

Figura 4: Estação de Tratamento de Esgoto Alegria



Fonte: Página da subsecretaria adjunta de gerenciamento de projetos do governo do RJ¹

¹ Disponível em: <http://www.egprio.rj.gov.br/Conteudo.asp?ident=480>

O Stadium Australia, mostrado na Figura 5, localizado em Sydney, com capacidade para 110.000 pessoas, utilizou o tratamento químico cristalizante em 25.000 m³ de concreto.

Figura 5: Stadium Australia



Fonte: Página do jornal Sydney Morning Herald²

E, por fim, a fábrica da General Motors em Indiana, Estados Unidos, que utilizou 18.000 m² de cristalizante aspergido sobre o concreto fresco para aumento sua resistência à abrasão, ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Fábrica General Motors



Fonte: Takagi, Júnior e Oliveira (2004)

² Disponível em: <http://www.smh.com.au/articles/2003/02/18/1045330606495.html>

2.2 Propriedades do Concreto Fresco

Via de regra, o concreto fresco é composto por partículas sólidas em suspensão (os agregados) em um meio viscoso (a pasta de cimento). Essa pasta de cimento é composta por um líquido (a água) e por partículas (os grãos de cimento), não sendo um líquido homogêneo. Olhando macroscopicamente, o concreto fresco flui como um líquido (FERRARIS, 1996).

Diz-se que ele é fresco até o momento em que sua pega tem início e, após o fim desse processo, o concreto é considerado endurecido. De acordo com Araujo, Rodrigues e Freitas (2000), nesse estado, “as propriedades desejáveis são as que asseguram a obtenção de uma mistura fácil de transportar, lançar e adensar, sem segregação”.

Com a evolução tecnológica foi possível explorá-lo de maneiras diferentes quando ele se encontra nesse estado. Assim, hoje em dia existem concretos que são: auto adensáveis, projetados, bombeáveis, compactados por rolo, entre outros.

Suas principais propriedades enquanto fresco são: consistência, plasticidade, poder de retenção da água e trabalhabilidade. A seguir, mais sobre cada uma dessas propriedades será exposto.

2.2.1 Consistência

Conforme Araujo, Rodrigues e Freitas (2000), a consistência é o grau de fluidez da mistura fresca de concreto e ela interfere diretamente na mobilidade da massa. Essa propriedade está diretamente relacionada com o teor água/materiais secos. Ele pode ser classificado como:

- **Seco ou úmido:** a relação água/materiais seco é entre 6% e 8%;
- **Plástico:** a relação água/matérias seco é maior que 8% e menor que 11%;
- **Fluido:** a relação água/material seco é alta, entre 11% e 14%.

O estado de consistência mais presente nas obras é o plástico. Uma maneira simples e ágil de determinar se a consistência está satisfatória é através do teste de abatimento, mais conhecido como *Slump Test*. Para a realização desse ensaio, usa-se o cone de Abrams, que possui 30 cm de altura, 10 cm de diâmetro menor e 20 cm de diâmetro maior, como mostra a Figura 7.

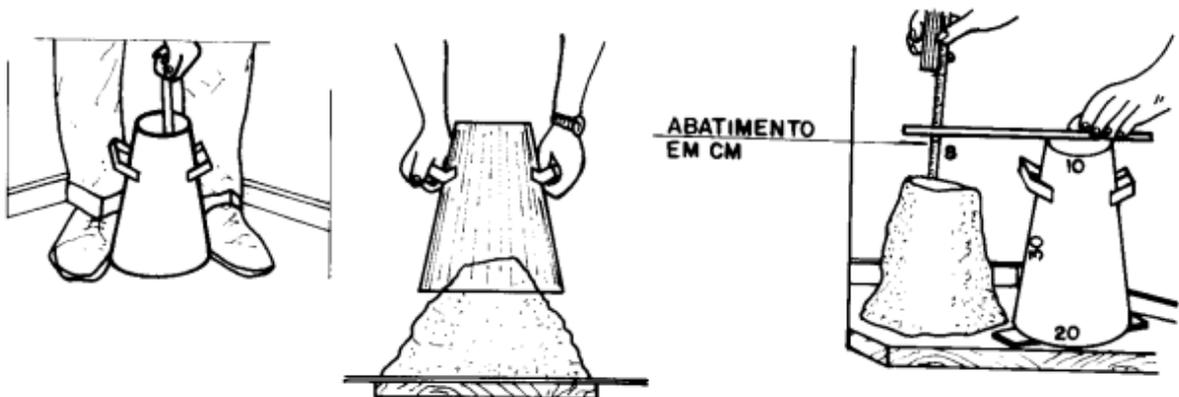
Figura 7: Cone de Abrams



Fonte: Google

Para inicializar o teste, segue-se a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Primeiramente o cone é colocado com firmeza sobre uma chapa levemente molhada, assim como o seu interior. Em seguida três camadas iguais de concreto, que são socadas com 25 golpes com uma barra de ferro de 16 mm de diâmetro, enchem o equipamento. Por fim, o cone é retirado e o abatimento do concreto é medido, conforme a Figura 8 abaixo.

Figura 8: Teste de abatimento



Fonte: Araujo, Rodrigues e Freitas (2000)

A NBR 8953 (ABNT, 2011) define que abatimento para diferentes tipos de elementos estruturais deve seguir o Quadro 2.

Quadro 2: Abatimento recomendado para diferentes tipos de aplicações

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações recomendadas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrudado, vibro-prensado ou centrifugafo
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos, de elementos de fundações e de elementos pré-moldados ou pré-fabricados
\$100	$100 \leq A < 150$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, paredes diafragma com lançamento convencional do concreto
S160	$150 \leq A < 220$	Elementos estruturais correntes como lajes, vigas, pilares, tirantes, paredes diafragma com lançamento por bombeamento
S220	≥ 220	Estruturas e elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras com concreto lançado por bombeamento, lajes de grandes dimensões, elementos pré-moldados ou pré-fabricados de concreto

O concreto auto-adensável deve ser classificado conforme o projeto 18:3000.03-001

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2011)

2.2.2 Plasticidade

A plasticidade é “a propriedade do concreto fresco identificada pela facilidade com que este é moldado sem se romper. Depende fundamentalmente da consistência e do grau de coesão entre os componentes do concreto” (ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS, 2000). Ou seja, se os componentes do concreto não estão coesos, eles se separam e causam segregação.

A segregação ocorre quando há separação dos grãos do agregado da pasta de cimento. Esse fenômeno pode ocorrer devido a diversos motivos como: movimentos bruscos no transporte e no lançamento, vibração excessiva no adensamento e até mesmo pela gravidade, quando os grãos maiores, por serem mais pesados, vão para o fundo das formas.

Dessa maneira, quanto menores forem as formas e maiores a taxa de armadura, maior deve ser o grau de plasticidade do concreto, a fim de evitar vazios após a concretagem da peça.

O tamanho do agregado miúdo interfere diretamente nessa propriedade do concreto, pois o excesso de areia aumenta a coesão da mistura, o que dificulta o lançamento e o adensamento do concreto nas formas, aumenta o consumo de cimento e, conseqüentemente, também aumenta o custo final do produto, uma vez que esse é o elemento mais caro.

O agregado graúdo, por sua vez, quando está em excesso, gera concretos com baixa coesão e mobilidade, sendo necessário grande esforço para lançá-lo e adensá-lo.

2.2.3 Poder de Retenção da Água

Ainda conforme Araujo, Rodrigues e Freitas (2000), o poder de retenção da água é o contrário da exsudação, definido como “fenômeno que ocorre quando a água se separa da massa e sobe à superfície do concreto”. Dessa maneira, a parte de cima fica muito úmida e, conseqüentemente, o concreto se torna poroso e com menos resistência.

Esse fenômeno ocorre quando a parte sólida da mistura não é capaz de reter a água de amassamento, seja porque há água em excesso, seja porque a porcentagem de finos (elementos que passa na peneira de malha 0,15 mm) é pequena. Portanto, conclui-se que o poder de retenção da água é a característica do concreto de evitar a exsudação.

2.2.4 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco de atender a um determinado objetivo com maior ou menor facilidade (ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS, 2000). Ou seja, essa é uma característica que não é apenas inerente ao material, como a consistência, mas que também envolve característica da obra que ele vai ser usado. Portanto, um concreto adequado para obras de grande porte e pouco armada pode não ser o ideal para obras pequenas com elevada quantidade de aço.

Assim, para que o concreto seja fabricado com a trabalhabilidade correta, deve-se pensar desde o seu transporte e lançamento, até o seu adensamento. Por isso definir a quantidade correta de material e de água que constituirá o concreto é extremamente importante, pois determina um traço que dê a trabalhabilidade necessária para cada caso, mas que ainda atenda às exigências de f_{ck} do projetista.

2.3 Propriedades do Concreto Endurecido

Como já foi dito, o concreto é considerado endurecido quando a sua pega chega ao fim. A seguir, serão abordadas as suas propriedades quando endurecido.

2.3.1 Resistência Mecânica

A resistência mecânica do concreto é a sua capacidade de resistir à tensão sem se romper (MEHTA; MONTEIRO, 2008), sendo que ele deve ter a capacidade de resistir a compressão, tração, flexão e cisalhamento. A resistência à compressão é a propriedade mais valorizada pelos projetistas e engenheiros de controle de qualidade.

O endurecimento do concreto pode demorar até dois anos para ser finalizado (ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS, 2000) e, com o aumento da idade do concreto, ele vai aumentando a sua resistência. Aos 28 dias, ele já possui de 75% a 90% da sua capacidade de resistência total.

O fator água/cimento e a porosidade do concreto são os fatores que mais influenciam nessa propriedade, sendo que eles são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior eles forem, menor será a resistência e vice-versa. Porém, ela é afetada por diversos outros elementos como: adensamento e condições de cura, idade, mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos utilizados, umidade, tensão e velocidade do carregamento, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Chama-se de:

- f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão, em megapascal.
- f_{ct} : resistência característica à tração pura, em megapascal.

É de conhecimento geral que a resistência a compressão do concreto é muito maior que a resistência à tração e flexão, podendo chegar a ser até dez vezes maior.

2.3.2 Durabilidade e Permeabilidade

Conforme Araujo, Rodrigues e Freitas (2000), a durabilidade é “a capacidade que o concreto possui de resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outra ação de deterioração”. Essa característica está diretamente ligada à resistência do concreto.

A sua durabilidade e vida útil também estão relacionadas com a sua permeabilidade, uma vez que o concreto impermeável impede o acesso de fluidos líquidos e gasosos e de agentes agressivos ao seu interior. Sendo assim, uma maior compactação é positiva para o concreto, uma vez que isso reduz o fluxo de água que eventualmente possa percolar para o interior da micro estrutura do concreto.

Vários fatores podem influenciar na sua permeabilidade e durabilidade. Entre eles estão:

- **Porosidade da pasta:** quanto mais porosa for a pasta e, conseqüentemente o concreto, menos permeável ele será. Isso ocorre porque com menos vazios existentes em sua microestrutura, há menos espaços para a água ocupar. A porosidade depende essencialmente de dois fatores: da relação água/cimento e do grau de hidratação da pasta. A finura do cimento também influencia: cimentos mais grossos tendem a produzir pastas de cimento com maior porosidade.
- **Agressão química:** especialmente a do sulfato que quando reage com o hidróxido de cálcio livre presente no cimento aumenta o volume dos sólidos, gerando uma expansão que provoca fissuração. Esses efeitos podem ser menores com um fator água/cimento menor que 0,40 e com a utilização de um bom cobrimento.

- **Retração Hidráulica:** resulta da retração da pasta do cimento que sofre modificações no seu volume devido à movimentação da água, gerando tensões sobre o agregado e fissurações. As fissuras devem ser evitadas pois abrem caminho para a água entrar, facilitando a sua percolação.

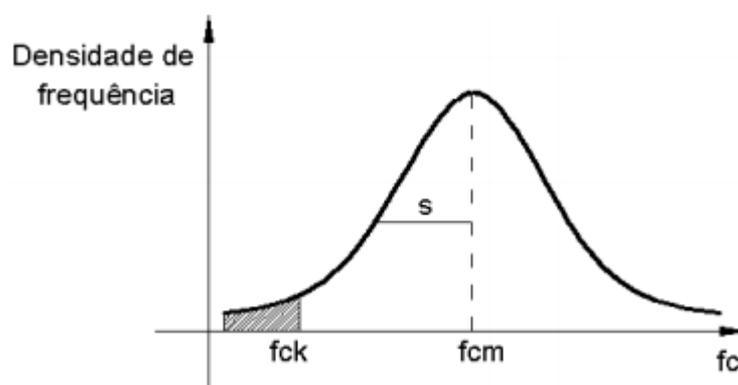
2.4 Ensaios de Caracterização do Concreto

2.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto é a principal propriedade utilizada pelos projetistas para saber se ele está adequado a uma determinada estrutura, pois ele suportar altas cargas nesse sentido. Além disso, a simplicidade do ensaio num geral, tanto para moldar os corpos de prova quanto para rompê-los, é outro ponto forte para a sua alta utilização (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A NBR 6118 (ABNT, 2003) define a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) como o valor da sua resistência para um lote de material, acima do qual se encontram 95% de todos os resultados possível do ensaio. Ou seja, após ensaiar um número grande de corpos de prova, é possível obter um gráfico no qual a abscissa mostra as tensões medidas e a ordenada a frequência de ocorrência de cada valor, obtendo-se uma curva de distribuição normal ou curva estatística de Gauss. O f_{ck} é o valor no qual 95% desses valores estão acima, como mostra a Figura 9.

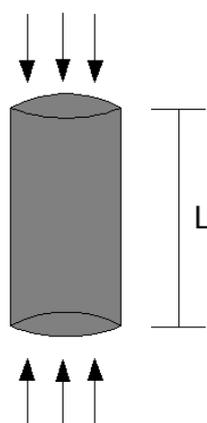
Figura 9: Distribuição normal para a resistência à compressão



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004)

Essa característica é medida em laboratório através de um ensaio uniaxial, conforme Figura 10, no qual a carga é aumentada progressivamente a fim de romper o corpo-de-prova moldado conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003) em até 3 minutos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para isso, são moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10cm de diâmetro e 20 cm de altura com o concreto retirado da betoneira. Eles serão rompidos numa prensa em idades diferentes. A NBR 5739, Concreto – Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007), recomenda que sejam com 24 h, 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

Figura 10: Resistência à compressão do concreto.



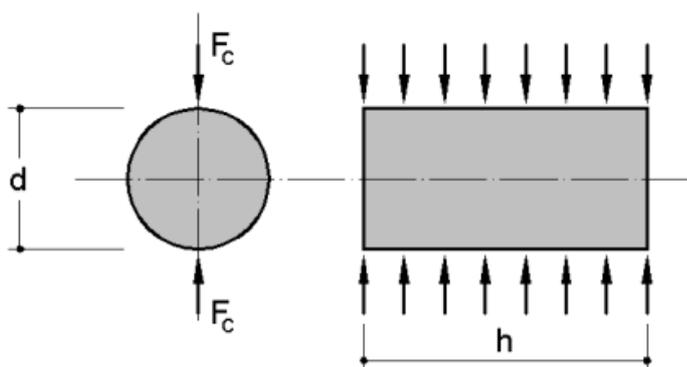
Fonte: Autora

2.4.2 Ensaio de Resistência à Tração do Concreto por Compressão Diametral

A resistência à tração possui o seu conceito análogo ao da compressão. Assim sendo, o seu f_{ct} é o valor cujo 95% dos resultados do ensaio estão acima. O concreto possui uma resistência à tração bem menor que à compressão, suportando apenas de 7% a 11% da carga que suportaria à compressão. Dessa maneira, os projetistas desconsideram a resistência à tração do concreto em seus projetos como maneira de aumentar a segurança à estrutura.

Esse ensaio pode ser realizado seguindo a NBR 7222 (ABNT, 2011) e foi desenvolvido pelo brasileiro Lobo Carneiro em 1943. Nele, o corpo-de-prova cilíndrico é colocado horizontalmente entre os pratos da prensa e a força é aplicada até a sua ruptura, conforme a Figura 11.

Figura 11: Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004)

2.4.3 Ensaio de Tempo de Pega do Concreto pela Resistência à Penetração

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o concreto tem a sua pega devido às reações entre o cimento e a água, embora o tempo de pega do concreto não coincida com o tempo de pega do cimento utilizado. A pega do concreto é definida como o “início da solidificação em uma mistura fresca de concreto”.

Ainda segundo os mesmos autores, de uma maneira mais prática, pode-se dizer que o início da pega representa aproximadamente o momento em que o concreto deixa de ser misturado, lançado e compactado de uma maneira adequada”. E o final da pega “é o tempo após o qual a resistência do concreto passa a se desenvolver a uma taxa significativa”.

No Brasil, a norma utilizada para determinar o tempo de pega do concreto é a NBR NM 9, Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração (ABNT, 2003). Ela define o início de pega como sendo “o tempo decorrido após o contato inicial do cimento com a água de amassamento, necessário para uma argamassa atingir a resistência à penetração igual à 3,4 MPa”. Já o fim de pega é o tempo necessário para a resistência seja de 27,6 MPa.

Nesse ensaio, é utilizado um penetrômetro de bolso para concreto que mede, de tempos em tempos, a resistência que foi necessária para penetrar um corpo-de-prova de 15 cm de diâmetro.

2.4.4 Ensaio de Absorção de Água do Concreto

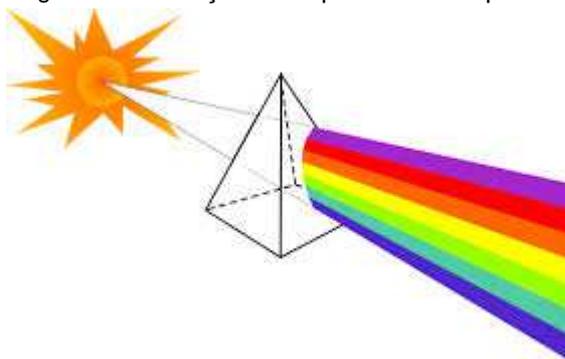
A água é um dos componentes essenciais ao concreto, uma vez que o cimento hídrico só reage na presença dela. Gradualmente, com o passar do tempo, a maior parte dessa água evapora, deixando poros vazios ou não saturados. Assim, o índice de vazios é determinante para o grau de absorção de água do concreto.

De modo geral, as amostras que possuem menor granulometria possuem maior índice de absorção. A NBR 9778 (ABNT, 2005) regulamenta o procedimento a ser feito para determinar a absorção de água por imersão e o índice de vazios.

2.4.5 Imagens Termográficas

De acordo com Rocha (2006), em 1800, Sir Friedch Wihlem Herschel (1738 – 1822), astrônomo alemão, realizou o experimento da dispersão da luz do sol com um prisma, como está ilustrado na Figura 27. Utilizando termômetros com bulbos pretos, ele percebeu que a temperatura ia aumentando à medida que o termômetro ia indo do violeta para o vermelho. Assim, ele observou que, de fato, a temperatura mais quente acontecia além da luz vermelha. Essa radiação mais quente não é visível ao olho nu e, atualmente, ela é conhecida como radiação infravermelha.

Figura 12: Ilustração do experimento do prisma



Fonte: Página do nonos anos³

³ Disponível em <http://nonosanoscса.blogspot.com.br/2013/09/teoria-das-cores-cor-so-existe-porque.html>

Todo corpo que está com a temperatura acima do zero absoluto emite calor. Quanto maior for a temperatura de um objeto, maior será sua radiação infravermelha e, ao captá-la, informações podem ser obtidas e analisadas. Atualmente, existem máquinas que captam essa radiação, gerando o que é chamado de imagens termográficas.

3. METODOLOGIA

Primeiramente, para cumprir o objetivo desse trabalho, foram realizados ensaios para caracterizar os componentes utilizados no concreto (cimento, brita, areia de cava e areia artificial). Esse material foi concedido por uma concreteira localizada em Brasília, e ele veio em duas remessas: as areias da primeira entrega foram utilizadas para rodar os concretos com o cimento CP III, e as da segunda para o concreto com cimento CP V. A brita utilizada em todos os concretos foi a da 1ª remessa. Somente após essa caracterização foram realizados os ensaios no concreto fresco e endurecido.

3.1 Caracterização do Material

3.1.1 Cimento

3.1.1.1 Finura do Cimento

Para determinar a finura do cimento foram seguidas as instruções da NBR 11579, Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) (ABNT, 1991). Para isso, foi utilizada a peneira nº 200, o fundo e a tampa do conjunto.

Primeiramente foram pesados 50 g de cimento, tanto do CP III quanto do CP V. Então, cada cimento foi colocado sobre a peneira, que foi encaixada à tampa e ao fundo. Movimentos de vaivém suaves foram imprimidos horizontalmente ao conjunto durante 5 minutos.

Em seguida, o fundo foi retirado e, com um bastão, golpes foram dados ao rebordo exterior do caixilho para que as partículas presas à ele fossem soltas e, com uma escova, a superfície inferior da tela foi limpada. Após essa etapa, a tampa do conjunto foi retirada e, novamente, movimentos de vaivém foram produzidos à peneira e ao fundo, mas dessa vez por 20 minutos. Durante essa atividade, o conjunto ia sendo girado e o fundo limpado em intervalos regulares. Ao final dessa etapa, a tampa foi recolocada e o fundo novamente limpo. O material que estava no fundo do conjunto foi desprezado.

Enfim, deu-se início à etapa final. A peneira foi novamente encaixada à tampa e ao fundo e o conjunto sofreu movimentos rápidos de vaivém e foi girado 60° a cada 10 segundos. Essa etapa foi repetida até que o material passante equivalesse a menos de 0,1% da massa inicial, ou seja, 0,05g.

Ao fim do experimento, pode-se concluir que o cimento CP III apresentou uma finura menor que os 8% exigidos pela NBR 5735 (ABNT, 1991), e que a finura do CP V foi menor que os 6% solicitados pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

3.1.1.2 Resistência à Compressão do Cimento Portland

Para determinar a resistência à compressão do cimento Portland, a NBR 7215, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996) foi seguida. O primeiro passo foi pesar o material a ser utilizado no ensaio, conforme o Quadro 3. As areias utilizadas são mostradas na Figura 12.

Quadro 3: Quantidade utilizada de material

Material	Massa para Mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal:	
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

Fonte: NBR 7215 (ABNT, 1996)

Figura 13: Areias utilizadas no ensaio



Fonte: Autora

Após a separação do material, eles foram colocados no misturador mecânico (Figura 13). Primeiramente colocou-se a água e o cimento, que foram misturadas por 30 segundos na velocidade baixa. Em seguida, as areias foram adicionadas no misturador, que homogeneizou o composto na velocidade alta por 30 segundos. Posteriormente o misturador foi desligado por 1 minuto e 30 segundos e coberto por um pano úmido e religado na velocidade alta por mais 1 minuto.

Figura 14: Misturador mecânico



Fonte: Autora

Em seguida, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram feitos com o auxílio de moldes (Figura 14). Esses moldes foram preenchidos pela argamassa em quatro camadas, sendo que cada uma recebeu 30 golpes com um soquete.

Essas amostras ficaram ao ar por cerca de 24h e, em seguida, foram desmoldadas e colocadas submersas em água para promover a cura. Foram rompidos 4 cp's para cada idade, sendo essas idades de 24h, 3, 7 e 28 dias.

Figura 15: corpos-de-prova de cimento



Fonte: Autora

As resistências à compressão obtidas estão expostas no Quadro 4. Os limites apresentados são as resistências mínimas para cada idade de cada cimento exigidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991) para o CP V e pela NBR 5735 (ABNT, 1991) para o CP III. Assim, conclui-se que os cimentos estão de acordo com o padrão da norma.

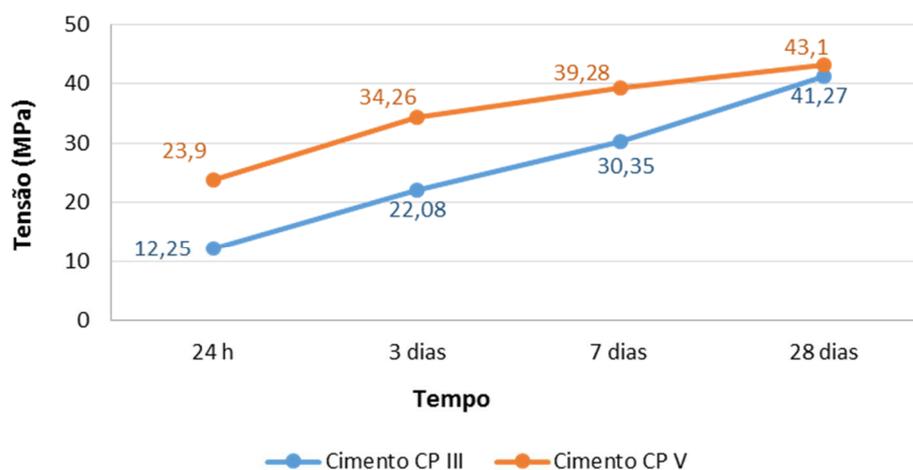
Quadro 4: Resultados das resistências à compressão dos cimentos CP III e CP V

Cimentos	CP III			CP V		
	Tensão (MPa)	Limite (MPa)	Desvio Máximo (%)	Tensão (MPa)	Limite (MPa)	Desvio Máximo (%)
24 h	12,25	--	5,04	23,9	14	0,82
3 dias	22,08	12	3,58	34,26	24	2,66
7 dias	30,35	23	4,33	39,28	34	3,47
28 dias	41,27	40	3,38	43,1	40	4,83

Fonte: Autora

O Gráfico 1 mostra visualmente o crescimento dessas resistências apresentadas.

Gráfico 1: Resultados resistências à compressão dos cimentos CP III e CP V



Fonte: Autora

Analisando a tabela e o gráfico, verificou-se que o CP V teve uma resistência inicial maior que a do CP III, como já era esperado, com uma diferença de mais de 10 MPa. Com o passar do tempo, porém, as resistências vão se aproximando e, aos 28 dias, os dois cimentos possuem resistências muito próximas, com cerca de 42 MPa.

3.1.1.3 Tempo de Pega do Cimento

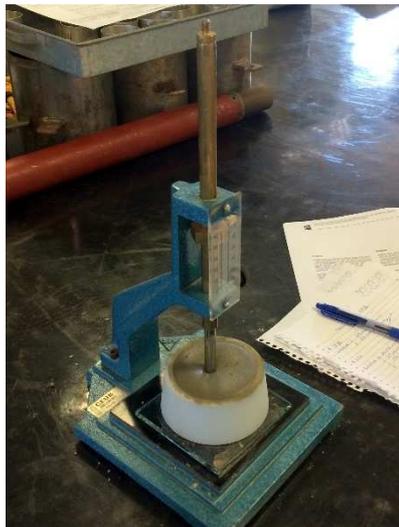
A primeira etapa para encontrar o tempo de pega do cimento foi descobrir a sua pasta de consistência normal, seguindo as instruções da NM 43, Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal (ABNT, 2003). Para isso, foi necessário utilizar o aparelho de Vicat, que, de acordo com a mesma norma, consiste em um suporte que contém uma haste móvel de metal inoxidável, em que em seu extremo podem ser fixadas diferentes tipos de agulha e sondas.

Para esse ensaio, usa-se a sonda de Tetmajer. Essa haste é deslizante e pode ser fixada em qualquer posição por meio de um parafuso. Há ainda uma escala graduada em milímetros que é fixada no suporte.

Segundo a NM 43 (ABNT, 2003), uma pasta de cimento é considerada normal quando a sonda Tetmajer penetra uma distância de 6 ± 1 mm da superfície. Para determiná-la, usou-se 500g de cimento Portland, que foi mesclado no misturado mecânico à uma certa quantidade de água.

Essa mistura foi, então, colocada num molde que foi posicionado sob o aparelho de Vicat, conforme a Figura 15.

Figura 16: Aparelho de Vicat



Fonte: Autora

Então, a haste foi arrumada de maneira que a sonda ficasse em contato com a superfície da pasta e, após 45 segundos, foi solta. Caso a sonda tenha penetrado menos de 6 ± 1 mm (penetração em que a pasta é considerada de consistência normal), uma nova pasta foi preparada com uma quantidade maior de água e, caso tenha penetrado mais de 6 ± 1 mm, a nova pasta foi feita com uma quantidade menor de água. Diversas tentativas foram realizadas até que o ensaio obtivesse o resultado necessário.

Com a determinação da pasta normal, foi possível dar início ao ensaio do tempo de pega do cimento, seguindo a NBR NM 65 (ABNR, 2003). Primeiramente, a sonda de Tetmajer foi trocada pela agulha de Vicat para determinação do início de pega. Após 30 minutos, a pasta de consistência normal foi posicionada sob a agulha de Vicat, que foi baixada até que sua extremidade tocasse a pasta. Então, a haste móvel é solta com rapidez e a leitura da escala feita até 30 segundos após a haste ter sido solta.

De tempos em tempos esse procedimento foi repetido até que a distância entre a agulha e a placa base fosse de 4 ± 1 mm, determinando assim o início do tempo de pega.

Para a determinação do fim de pega do cimento, o procedimento utilizado foi o mesmo, porém a agulha de Vicat de início de pega foi substituída pela de fim de pega e o molde utilizado foi invertido. O ensaio foi considerado concluído quando a agulha penetrou apenas 0,5 mm na pasta, ou seja, não provocou nenhuma marca no corpo-de-prova. O Quadro 5 mostra os tempos de pegadas aferidos no ensaio e os recomendados pelas normas.

Quadro 5: Tempos de pega aferidos e exigidos pela norma dos cimentos

CIMENTO	CP III		CP V	
	AFERIDO	NORMA	AFERIDO	NORMA
Início de Pega (h)	01:35	01:00	01:25	01:00
Fim de Pega (h)	02:35	12:00	02:25	10:00

Fonte: Autora

Averiguou-se que os tempos de início e fim de pega do CP V ocorreram 10 minutos antes dos do CP III. Eles também se deram dentro dos limites indicados pelas normas NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR 5735 (ABNT, 1991).

3.1.2 Agregados

3.1.2.1 Granulometria

Saber a composição granulométrica dos agregados utilizados é muito importante, pois pode explicar comportamentos do concreto. Para isso, usou-se como referência NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Nesse ensaio, foram utilizadas as peneiras com as seguintes aberturas em mm: 31,5; 25; 19; 12,5; 9,5; 6,3; 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15.

Os agregados utilizados na composição do concreto (brita 1, areia artificial e areia cava) foram colocados nas quantidades indicadas pela norma na estufa por 24h e, em seguida, sobre o conjunto de peneiras. Esse conjunto sofreu agitação mecânica por 7 minutos, conforme a Figura 16.

Figura 17: Conjunto completo de peneiras utilizado e parte dele no misturador mecânico



Fonte: Autora

Assim, obteve-se a distribuição granulométrica, a dimensão máxima e o módulo de finura para cada um dos materiais utilizados, como mostra o Quadro 6.

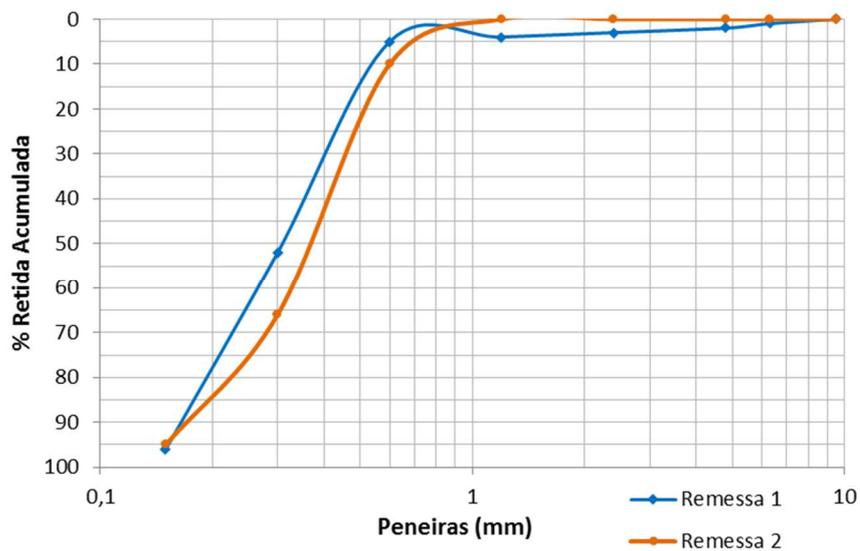
Quadro 6: Composição granulométrica dos agregados

Peneiras (mm)	Areia Rosa		Areia Artificial		Brita 1
	Remessa 1	Remessa 2	Remessa 1	Remessa 2	Remessa 1
25	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	7
12,5	0	0	0	0	76
9,5	0	0	0	0	98
6,3	1	0	0	0	100
4,8	2	0	1	0	100
2,4	3	0	53	10	100
1,2	4	0	91	48	100
0,6	5	10	99	75	100
0,3	52	66	99	90	100
0,15	96	95	99	97	100
Fundo	100	100	100	100	100
D máx (mm)	0,6	1,2	4,8	4,8	25
Módulo de Finura	1,63	1,71	4,42	3,21	7,05

Fonte: Autora

Em posse desses dados, as curvas granulométricas de cada um dos materiais foram geradas, e encontram-se representadas nos Gráficos 2, 3 e 4.

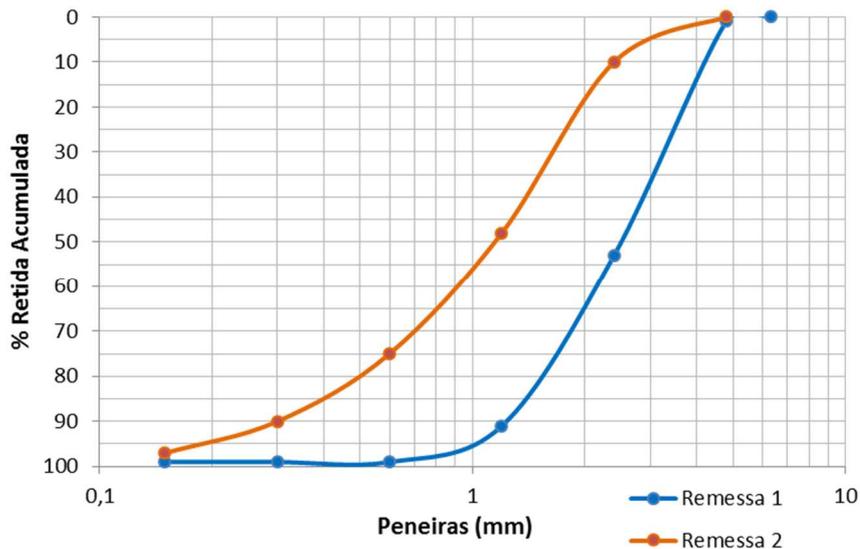
Gráfico 2: Curva granulométrica – areia cava



Fonte: Autora

Nota-se que as areias apresentaram distribuição granulométrica similar, contudo a da primeira remessa apresenta um módulo de finura menor, 1,63, enquanto a segunda remessa foi de 1,71. Portanto, a remessa 1 de areia cava é mais fina que a segunda, o que é confirmado pela dimensão máxima de 0,6 mm para a remessa 1 e de 1,2 mm para a remessa 2.

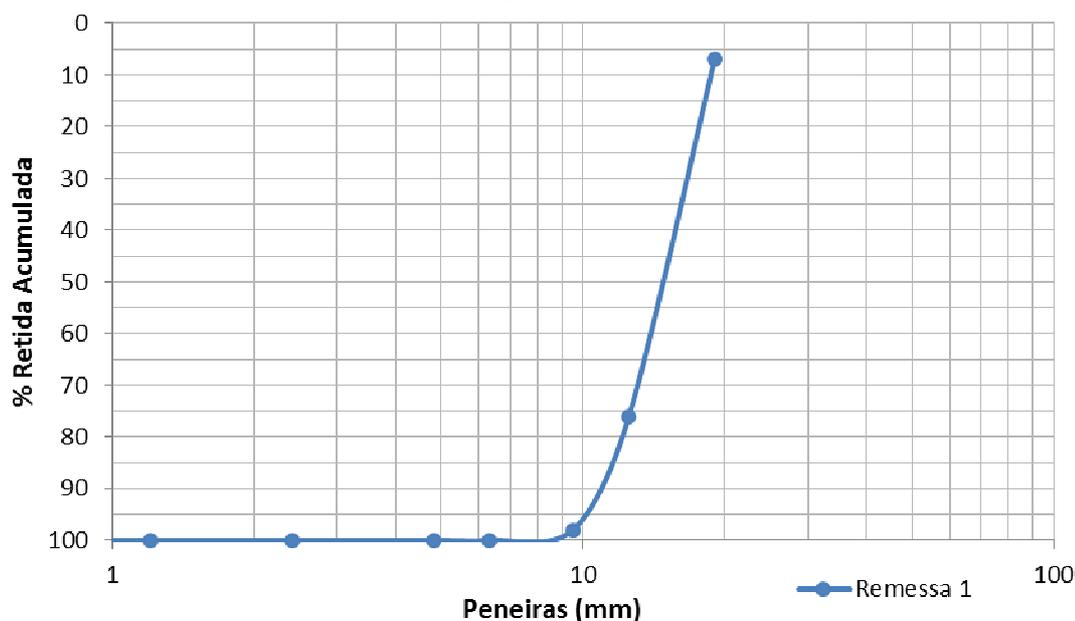
Gráfico 3: Curva granulométrica - areia artificial



Fonte: Autora

Com a areia artificial a diferença entre as remessas foi mais evidente, como pode ser visto no Gráfico 3. A remessa 2 apresenta partículas menores, tendo como módulo de finura 3,21, enquanto a remessa 1 foi de 4,42. Porém, as duas tiveram dimensão máxima de 4,8 mm, o que as classifica como agregados miúdos.

Gráfico 4: Curva granulométrica - brita1



Fonte: Autora

Apenas a primeira remessa da brita 1 foi utilizada nos concretos. Ela apresentou um módulo de finura de 7,05 e a dimensão máxima de 25 mm. Ademais, através do Gráfico 4, nota-se que 100% do material já estava retido na peneira de 6,3 mm, classificando-a como agregado graúdo.

3.1.2.2 Massa Específica da Areia

Nesse experimento, utilizou-se a NBR 9776, Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman (ABNT, 1987). O primeiro passo foi colocar na estufa 500g da areia na estufa a 105°C por 24h, para que ela fosse seca. Então, preencheu-se o frasco Chapman (Figura 17) até a marca dos 200 cm³. Em seguida, a areia foi colocada dentro do frasco com o auxílio de um funil, para que o mínimo de material fosse perdido. Então, fez-se uma nova leitura que indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-areia.

Através da fórmula $\gamma = \frac{500}{L-200}$ foi possível descobrir a massa específica da areia, onde:

γ : massa específica do agregado miúdo em g/cm³;

L: leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo)

Figura 18: Ensaio de determinação da massa específica pelo método de Chapman



Fonte: Autora

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 7:

Quadro 7: Massa específica da areia cava

Areia Rosa		
	Remessa 1	Remessa 2
γ (g/cm ³)	2,649	2,604

Fonte: Autora

A massa específica da 2ª Remessa foi um pouco menor, com diferença inferior a 2%, quando comparada com a da 1ª Remessa. Possivelmente isso ocorreu porque essa é um pouco mais fina que aquela, como foi mostrado na distribuição granulométrica, preenchendo mais os vazios existentes e deixando-a mais densa.

3.2 Concretos

Para esse trabalho, foram rodados 4 concretos, variando o tipo de cimento utilizado e o emprego ou não do aditivo cristalizante. O Quadro 8 apresenta essas variações assim como suas respectivas nomenclaturas.

Quadro 8: Nomenclaturas e variáveis de trabalho

SIGLA	CONCRETO
CCPIII-S	Concreto com cimento CPIII sem aditivo cristalizante
CCPIII-C	Concreto com cimento CPIII com aditivo cristalizante
CCPV-S	Concreto com cimento CPV sem aditivo cristalizante
CCPV-C	Concreto com cimento CPV com aditivo cristalizante

Fonte: Autora

O traço utilizado como base foi o sugerido por uma empresa concreteira de Brasília e ele foi escolhido por ser bastante empregado nas obras da região. O *slump* utilizado como referência foi de 10 ± 2 cm. O Quadro 9 expõe a sua composição em massa seca, sendo utilizado como agregados miúdos a areia cava (AR) e areia artificial (AA).

Quadro 9: Traço do concreto

PROPORÇÃO:	1	1,278	1,278	3,217	0,57
PRODUTO:	Cimento	AR	AA	B1	Água

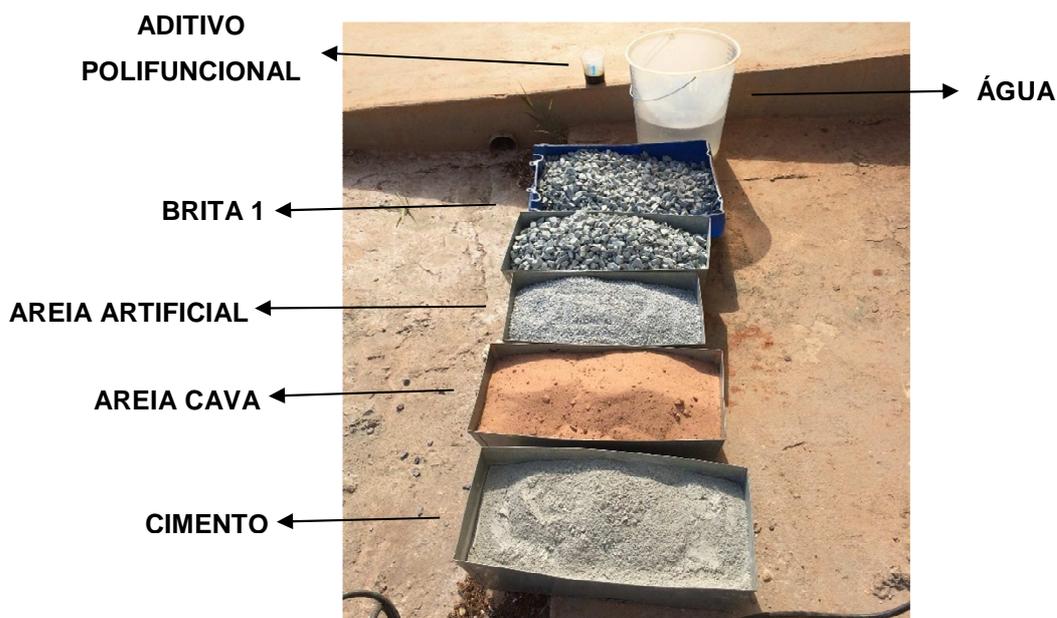
Fonte: Autora

Foi usado também um aditivo plastificante polifuncional redutor de água, cujo consumo utilizado foi de 0,68% sobre peso do cimento.

O aditivo cristalizante utilizado foi fornecido em pó, apresenta tonalidade acinzentada e veio em um saco de 15 kg. De acordo com o manual técnico do fabricante, ele possui uma densidade de $1,110 \text{ g/cm}^3$ e a dosagem recomendada é de 3% a 4% do peso de cimento.

Para o trabalho em questão, utilizou-se a média de 3,5% sobre o peso do cimento. O aditivo foi adicionado ao traço como realizam na maioria das obras, sem nenhum ajuste do traço. A Figura 18 mostra a separação desses materiais antes do concreto ser rodado.

Figura 19: Componentes do concreto separados



Fonte: Autora

As areias de cava e artificial usadas para rodar os concretos com o cimento CPIII foram diferentes dos usados no concreto com CPV, já que eles vieram em duas remessas. Já a brita 1 foi utilizada a mesma remessa em todos os tipos de concreto.

Conforme foi mostrado no item 3.2.1.2, a areia artificial da remessa 2era bem mais fina, e o cimento CP V também, sendo necessário uma adaptação na água do traço utilizado para o CCPV. Dessa maneira, os fatores água/cimento (a/c) e água/mistura seca (A %) foram diferentes, tanto devido ao acréscimo de água, quanto devido à adição do cristalizante.

O Quadro 10 mostra esses teores de cada concreto, além do teor de argamassa (α) para os concretos com os cimentos CP III e CP V.

Quadro 10: Parâmetros de mistura

CONCRETO	a/c	A (%)	α (%)
CCP III	0,57	8,4	52,5
CCPV	0,61	9,0	52,5

Fonte: Autora

Os concretos foram rodados em uma betoneira com capacidade para 150 L, conforme a Figura 19, e moldados seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2003). Para chegar aos objetivos do trabalho, diversos ensaios foram desempenhados.

Figura 20: Betoneira utilizada



Fonte: Autora

Em cada traço, consumiu-se a quantidade de material de maneira que fossem moldados corpos-de-prova suficientes para todos os ensaios desejados, conforme está descrito no Quadro 11, que mostra os ensaios realizados, a quantidade de corpos-de-prova cilíndricos e suas dimensões e, por fim, a idade de cada ensaio. A Figura 21 apresenta os corpos-de-prova moldados para cada traço.

Quadro 11: Ensaios realizados

ENSAIO	CPs/TRAÇO	DIMENSÕES (cm)	IDADES (dias)
Início de pega	2	15x15	0
Resistência à compressão	2	10x20	3, 7 e 28
Resistência à tração	2	10x20	3, 7 e 28
Absorção de água	1	15x30	> 28
Permeabilidade pelo cachimbo	1	15x30	> 28
Imagens termográficas	1	15x30	> 28

Fonte: Autora

Figura 21: Moldagem dos corpos-de-prova de concreto



Fonte: Autora

Além dos testes apresentados, também foi avaliado o abatimento de tronco de cone de todos os concretos. A seguir serão descritos os ensaios que foram realizados para verificar as propriedades do concreto fresco e endurecido.

3.2.1 Tempo de Início de Pega do Concreto

Nesse ensaio, foram seguidas as recomendações da NBR NM 9, Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração (ABNT, 2003). De acordo com ela, o tempo de início de pega é o “tempo decorrido após o contato inicial do cimento com a água de amassamento necessário para uma argamassa atingir a resistência à penetração igual a 3,4 MPa”.

A primeira etapa do procedimento foi passar a amostra do concreto na peneira de malha 4,75 mm e preencher dois moldes cilíndricos de 15 x 30 cm até a metade. Essa amostra foi adensada manualmente com o auxílio de uma haste metálica. Em seguida, os moldes foram cobertos com pano úmido para evitar a perda de água (Figura 21).

Figura 22: Amostras cilíndricas cobertas com pano úmido



Fonte: Autora

Após quatro horas do início da mistura, foram realizadas leituras a cada hora da resistência à penetração utilizando um penetrômetro de bolso para concreto. Antes de medir a resistência, o excesso da água era retirado inclinando o molde e absorvendo-a com um papel-toalha. Então o penetrômetro de bolso era pressionado gradualmente contra a superfície da amostra e a sua outra extremidade mostrava a tensão necessária para tal esforço, conforme a Figura 22.

Figura 23: Utilização do penetrômetro de bolso



Fonte: Autora

Enfim, com os dados obtidos, foi traçado um gráfico em que o tempo em minutos é representado na abscissa e na ordenada a resistência à penetração em MPa em escala logarítmica. O momento em que o penetrômetro indicou uma força de 3,4 MPa no gráfico aponta o início da pega do concreto

3.2.2 Resistência à Compressão

Para determinar a resistência à compressão do concreto, foram utilizados seis corpos de prova de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, que foram rompidos com 3, 7 e 28 dias, dois em cada idade. Até o dia da execução do ensaio esses corpos-de-prova foram mantidos submersos em água para promover a cura.

Esses corpos-de-prova foram comprimidos numa prensa hidráulica até a ruptura. Esse equipamento mostra o pico da força necessária para romper o concreto em kilonewtons (kN). Ao dividir esse valor pela área da seção transversal, obteve-se a tensão em MPa.

3.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Assim como na resistência à compressão, também foram ensaiados seis corpos-de-prova com 3, 7 e 28 dias, dois em cada idade. A mesma prensa hidráulica foi utilizada. A norma de referência foi a NBR 7222, Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011).

Para esse ensaio, utilizou-se pratos retangulares, e o corpo-de-prova foi colocado deitado, apoiado sobre uma fina tira de madeira, conforme a Figura 23. Então, a prensa era ligada e, assim, obteve-se a força necessária em kilonewtons para romper o corpo-de-prova.

Dessa maneira, o f_{ct} é obtido através da seguinte fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi dl}$$

Onde: F = força máxima obtida no ensaio, em N;

d = diâmetro do corpo-de-prova, em mm;

l = comprimento do corpo-de-prova, em mm.

Figura 24: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autora

3.2.4 Absorção, Índice de Vazios e Massa Específicas

Uma maneira de perceber se o aditivo cristalizante está realmente cumprindo seus objetivos é medindo a absorção de água e o índice de vazios do corpo-de-prova. Isso é possível seguindo as recomendações da NBR 9778, Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005). Para esse ensaio, um corpo-de-prova de 15 x 30 cm foi dividido em três, e dois desses pedaços foram utilizados (Figura 24).

Figura 25: Corpos-de-prova utilizados



Fonte: Autora

Primeiramente, os corpos-de-prova foram colocados na estufa por 72 h para que ficassem secos. A sua massa seca foi registrada (m_s).

Em seguida, os corpos-de-prova ficaram imersos em água por mais 72 h. Para otimizar a absorção de água do concreto, eles ainda foram colocados num recipiente cheio de água que foi levada à ebulição, lá permanecendo por 5 h. Então, as amostras foram retiradas da água quente e pesadas em uma balança hidrostática (Figura 25). Essa massa foi considerada a massa imersa (m_i).

Enfim, com um pano o excesso de água foi retirado e obteve-se o peso da amostra saturada (m_{sat}).

Figura 26: Corpos-de-prova na balança hidrostática



Fonte: Autora

Possuindo esses três dados, foi possível calcular a absorção, o índice de vazios e a massa específica da amostra seca, saturada e real utilizando as fórmulas a seguir.

- Absorção (A):

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$$

- Índice de Vazios (I_V):

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$$

- Massa Específica da Amostra Seca (ρ_s):

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$$

- Massa Específica da Amostra Saturada (ρ_{sat}):

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i}$$

- Massa Específica Real (ρ_r):

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

3.2.5 Permeabilidade pelo Método do Cachimbo

A permeabilidade do concreto também foi medida através da utilização do cachimbo de permeabilidade, instrumento esse feito de vidro que, com silicone, foi colado na parede do corpo-de-prova tomando o cuidado de deixá-lo bem vedado, como ilustra a Figura 26.

Esse cachimbo possui uma escala que indica a quantidade de água, em volume (mL). Ele foi então preenchido com água até a sua marca máxima de 4 mL e leituras foram feitas após 4:30h, 8:30h e 24:00h após seu preenchimento. Em seguida, obteve-se a permeabilidade do concreto, que é a diferença entre os 4 mL iniciais e a leitura feita em cada um daqueles horários.

Figura 27: Cachimbo de permeabilidade



Fonte: Autora

3.2.6 Imagens termográficas

Visando melhor determinar os efeitos que o aditivo redutor de permeabilidade tem no concreto, um corpo-de-prova de 15x30 cm de cada tipo de concreto rodado foi colocado em uma lâmina d'água de 6 cm por 24 h no laboratório à temperatura ambiente, cerca de 24°C. Então, imagens termográficas com uma máquina Flir T420 foram obtidas para avaliar a absorção por capilaridade dos diferentes concretos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os concretos em cada um dos ensaios descritos nas metodologias com suas respectivas análises.

4.1 Ensaio no Estado Fresco

4.1.2 Ensaio de Abatimento

Para cada um dos tipos de concretos rodados foi medido o abatimento, e os resultados serão apresentados no Quadro 12. Os concretos com cimento CP III atenderam o *slump* previsto de 10 ± 2 cm.

Quadro 12: Abatimentos dos concretos

CONCRETO	SLUMP (cm)
CCP III-S	11,5
CCP III-C	9,0
CCPV-S	7,5
CCPV-C	6,0

Fonte: Autora

Observa-se que o concreto CCPV-S foram realizados com as areias da remessa 2 e, portanto, com agregados mais finos, apresentaram um *slump* abaixo do desejado e inferior ao do concreto CCPIII. Isso se deve a maior demanda de água pela areia artificial ser bem mais fina, bem como o cimento. Como o objetivo do trabalho era comparar as resistências dos diferentes concretos, fez-se apenas um pequeno incremento de água, ajustando a relação a/c de 0,57 para 0,61.

Verificou-se que os *slumps* dos concretos com cristalizante foram menores que os dos sem aditivo. O acréscimo do cristalizante fez com que a consistência do concreto aumentasse, deixando seu teste de abatimento menor.

4.1.3 Tempo de Início Pega

A média das leituras feitas nas duas amostras, para o ensaio do tempo de pega, por meio da resistência à penetração encontram-se no Quadro 13. Vale lembrar que o início de pega do concreto é considerado quando ele apresenta uma resistência à penetração de 3,4MPa.

Quadro 13: Resultados do tempo de pega do concreto

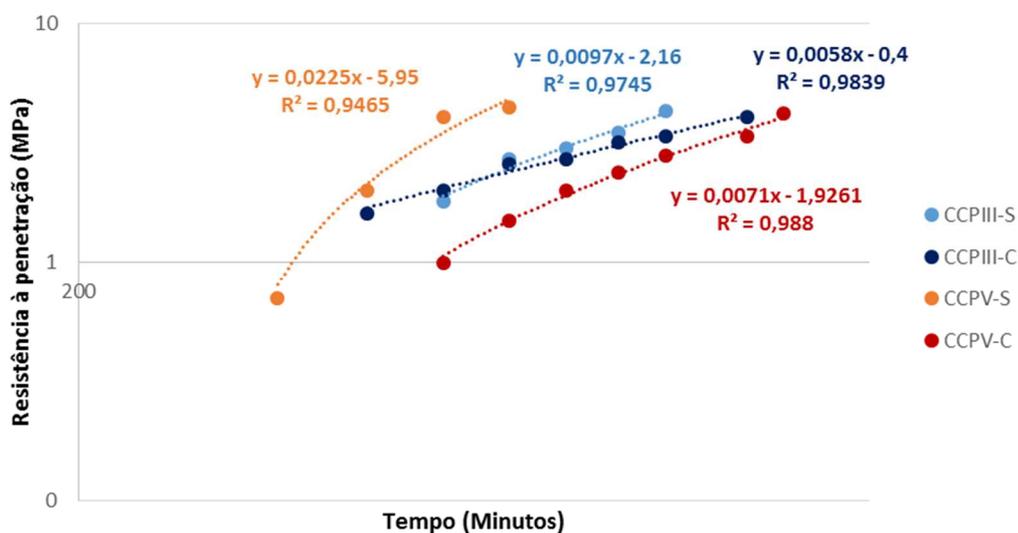
TEMPO		RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (MPa)			
HORAS	MINUTOS	CCPIII-S	CCPIII-C	CCPV-S	CCPV-C
05:00	300	--	--	0,7	--
06:00	360	--	1,6	2	--
07:00	420	1,8	2,0	4,1	1
08:00	480	2,7	2,6	4,5	1,5
09:00	540	3,0	2,7	4,5	2
10:00	600	3,5	3,2	--	2,4
11:00	660	4,3	3,4	--	2,8
12:00	720	--	--	--	--
13:00	780	--	4,1	--	3,4
14:00	840	--	--	--	4,2

Fonte: Autora

O Gráfico 5 representa os valores obtidos de resistência à penetração ao longo do tempo, em escala log-log. Nele, foi traçada uma curva de tendência linear, com a qual descobriu-se a sua equação e o coeficiente de correlação (R^2). A norma requer que esse R^2 seja de, no mínimo, 0,98.

Ao substituir o y das equações das linhas de tendência por 3,4, valor definido como a resistência que determina o início de pega do concreto, determinou-se o tempo (x), em horas e minutos, que o início da pega aconteceu. Esses valores estão representados no Quadro 14.

Gráfico 5: Tempo de início de pega do concreto



Fonte: Autora

Quadro 14: Tempo de início de pega do concreto.

CONCRETO	EQUAÇÃO	R ²	x (min)	x (hora)
CCPIII-S	$y = 0,0097x - 2,16$	0,974	617,8	10:18
CCPIII-C	$y = 0,0058x - 0,4$	0,983	760,0	12:40
CCPV-S	$y = 0,0225x - 5,95$	0,946	425,0	07:05
CCPV-C	$y = 0,0071x - 1,926$	0,988	760,9	12:40

Fonte: Autora

Através da análise do quadro e do gráfico, compreendeu-se que tanto no CCPIII quanto no CCPV o aditivo cristalizante retardou o início de pega. Porém, no segundo caso, essa diferença foi bem maior, já que o concreto com aditivo levou cerca de 12:40h para iniciar a pega, enquanto o que não o possuía levou cerca de 07:05h. Já com o CCPIII, essa diferença foi de cerca de 2:20h.

Apesar do maior retardo para o cimento CP V, o tempo de início de pega dos concretos com os aditivos foi o mesmo, 12:40h, independente do tipo de cimento.

4.2 Ensaio no Estado Endurecido

4.2.1 Resistência à Compressão

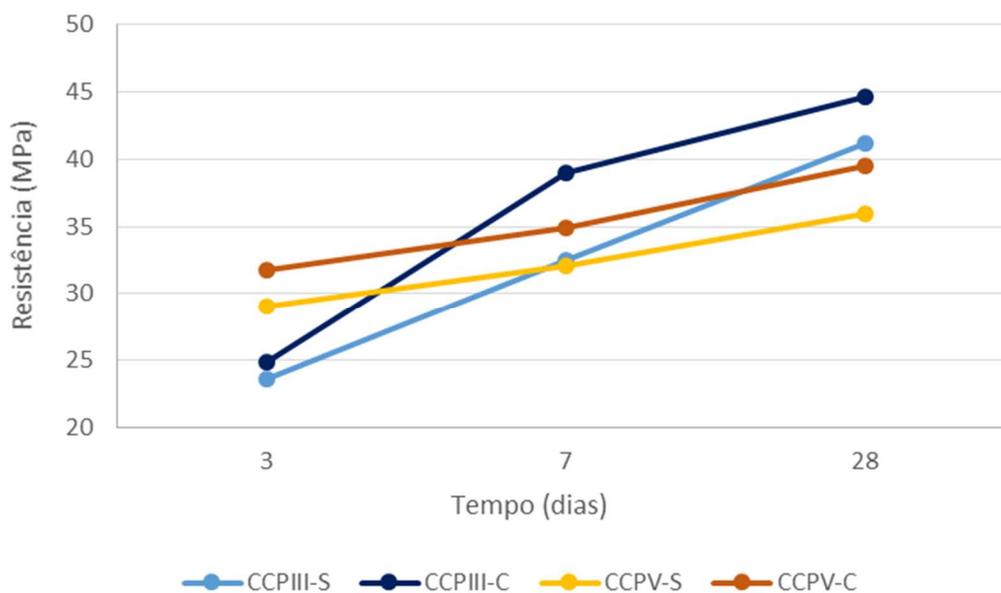
Os resultados obtidos com as resistências à compressão estão apresentados no Quadro 15. Nele também há o ganho de resistência em porcentagem, sendo que esse valor foi calculado com base na maior leitura obtida para cada tipo de concreto. Com esses resultados, traçou-se Gráfico 6, que também utilizou sempre o maior valor obtido no rompimento dos dois corpos-de-prova.

Quadro 15: Resistência à compressão dos concretos

Resistência à Compressão										
DIAS	CCPIII-S (MPa)		CCPIII-C (MPa)		GANHO (%)	CCPV-S (MPa)		CCPV-C (MPa)		GANHO (%)
3	20,1	23,6	22,5	24,9	5,5	28,9	29,1	30,1	31,7	9,1
7	31,2	32,5	36,4	38,9	19,7	31,8	32,1	33,8	34,9	8,8
28	38,1	41,1	42,2	44,7	8,6	33,9	36,0	38,4	39,5	9,9

Fonte: Autora

Gráfico 6: Resistência à compressão dos concretos



Fonte: Autora

Observa-se que os concretos com o CPV possuem uma resistência inicial maior que as do CIII. Porém, aos 28 dias, essa diferença já não é perceptível, sendo que os CIII chegaram a ter uma resistência à compressão maior. Isso é claramente observado no gráfico e pode ser explicado pela menor relação a/c para os concretos com CIII.

Ademais, os concretos com o aditivo cristalizante tiveram um ganho na resistência de cerca de 2 MPa. Uma possível explicação é que os cristais que se formam no vazio do concreto podem deixá-lo menos poroso e mais resistente.

Portanto, o cristalizante quando adicionado ao concreto não prejudica a sua resistência à compressão, mesmo no caso do CCPV-C que teve o início de pega retardado. Sendo assim, o ganho no caso do cimento CIII variou de 5,5 a 19,7%, dependendo da idade e no caso do CPV esse ganho ficou na faixa dos 9%.

4.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O Quadro 16 mostra as resistências à tração apresentadas pelos concretos com 3, 7 e 28 dias com as duas amostras.

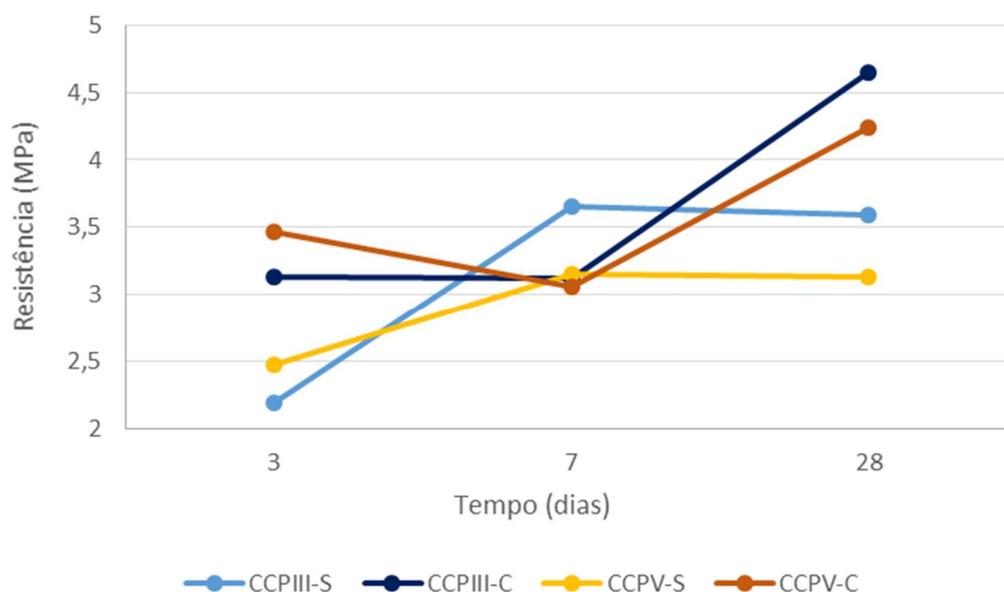
Quadro 16: Resistência à Tração

Resistência à Tração (MPa)										
DIAS	CCIII-S		CCIII-C		GANHO (%)	CCPV-S		CCPV-C		GANHO (%)
3	2,2	2,2	2,7	3,1	42,9	--	2,5	--	3,5	40,5
7	3,5	3,7	3,0	3,1	-14,5	3,0	3,2	3,1	3,1	-2,9
28	3,4	3,6	3,6	4,7	29,5	3,3	3,1	4,3	4,2	35,5

Fonte: Autora

Em posse desses dados, traçou-se o Gráfico 7 utilizando o maior resultado obtido do exemplar. O eixo das abscissas representa o tempo em dias, enquanto o eixo das ordenadas representa a resistência à tração do corpo-de-prova.

Gráfico 7: Resistência à tração dos concretos



Fonte: Autora

As leituras com 7 dias do CCPV podem ter sido aferidas erroneamente devido à inexperiência na realização do ensaio, e devido à dificuldade de ajuste do corpo de prova nos pratos na prensa, sendo que que os mesmos podem não ter ficado centralizados nos apoios de madeira.

Porém, os resultados com 3 e 28 dias podem ser considerados confiáveis e, assim, percebeu-se que houve um aumento considerável na resistência à tração nos concretos com aditivo, chegando até a 42%. Assim como na resistência à compressão, esse fato pode ser explicado pelo preenchimento de vazios que os cristais promovem.

4.2.3 Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica

Para esse ensaio, foram usadas duas amostras de cada tipo de concreto. Com a média obtida dos resultados dessas amostras, tornou-se exequível a obtenção da absorção, índice de vazios e massas específicas deles, conforme o Quadro 17.

Quadro 17: Absorção, índice de vazios e massas específicas

CONCRETO	ABSORÇÃO (%)	ÍNDICE DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA		
			AMOSTRA SECA	AMOSTRA SATURADA	REAL
CCPIII-S	5,73	13,13	2,30	2,43	2,64
CCPIII-C	5,28	12,09	2,29	2,41	2,60
GANHO (%)	-7,85	-7,92	-0,43	-0,82	-1,52
CCPV-S	5,98	13,48	2,26	2,39	2,61
CCPV-C	6,28	14,13	2,25	2,39	2,62
GANHO (%)	5,02	4,82	-0,44	0,00	0,38

Fonte: Autora

Observa-se que a variação do índice de vazios foi muito parecida com a variação da absorção, o que é esperado, uma vez que esses dois termos são proporcionais. Apesar da diferença não ter sido significativa, tanto a absorção quanto o índice de vazios do CCPIII diminuíram com o acréscimo do cristalizante, enquanto com o CCPV eles aumentaram. Assim, pode-se inferir que o cristalizante não cumpriu seu objetivo quando foi utilizado o cimento CP V até os seus 28 dias.

Isso pode ter acontecido por causa da maior porosidade dos concretos com CP V devido à maior relação a/c, e por isso o tempo de cristalização do aditivo não foi suficiente para preencher todos os vazios deste concreto. Como o cimento CPIII apresenta escória em sua composição, o que resulta em concretos com menor porosidade, houve uma menor absorção e índice de vazios.

Já as massas específicas não foram afetadas pelo acréscimo do aditivo redutor de permeabilidade, uma vez que suas variações foram de menos de 1%.

4.2.4 Permeabilidade pelo Método do Cachimbo

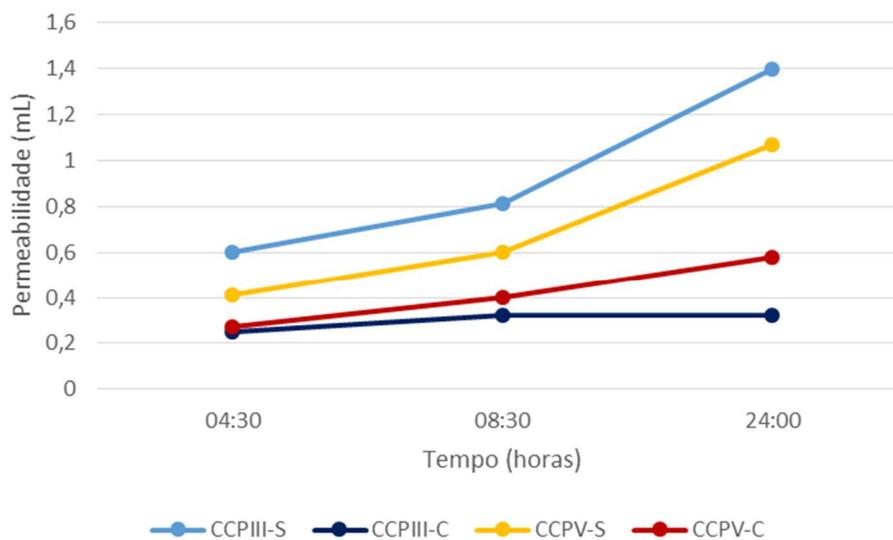
Através desse experimento, obteve-se a permeabilidade de cada amostra, que são mostradas no Quadro 18 e no Gráfico 8.

Quadro 18: Resultados da permeabilidade pelo método do cachimbo

TEMPO (h)	PERMEABILIDADE			
	CCPIII-S	CCPIII-C	CCPV-S	CCPV-C
04:30	0,6	0,25	0,41	0,27
08:30	0,81	0,32	0,6	0,4
24:00	1,4	0,32	1,07	0,58

Fonte: Autora

Gráfico 8: Permeabilidade dos concretos



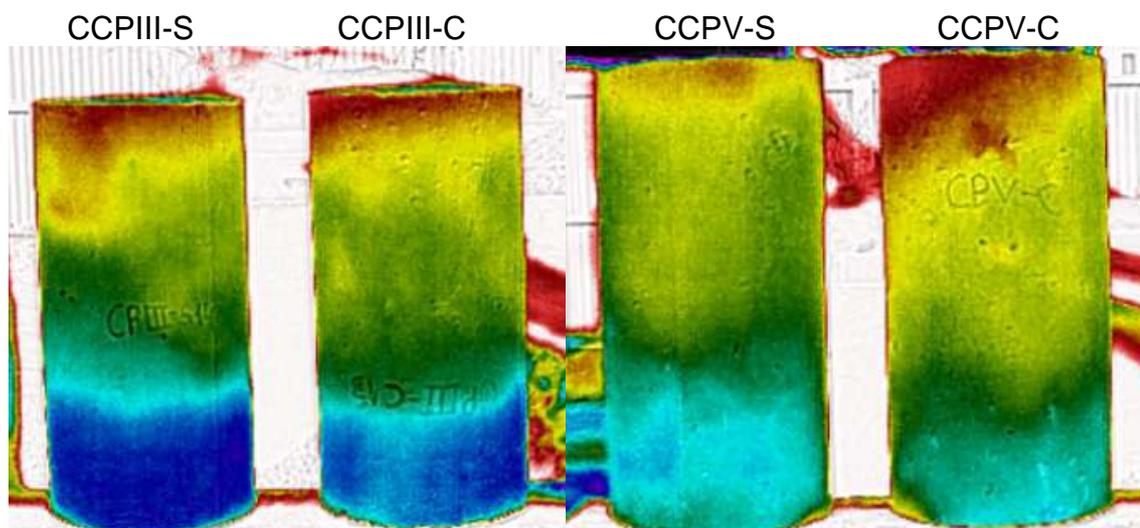
Fonte: Autora

Ao observar valores e principalmente o gráfico, é notável que o cristalizante efetivamente reduziu a permeabilidade à água do concreto para os dois tipos de cimento. Porém, essa melhora foi muito mais eficiente com o CCPIII e pode ter ocorrido devido à presença da escória no CP III, que resulta em um concreto mais impermeável e portanto, com menores capilares que o cristalizante tem para preencher.

4.2.5 Imagens Termográficas

Com o auxílio de uma máquina especializada, imagens com e sem termografia tiradas dos corpos-de-prova após colocados em contato com lâmina d'água de 6 cm por cerca de 24h estão apresentadas nas Figuras 28 e 29. Assim, comparou-se a absorção de água de cada um dos concretos rodados.

Figura 28: Imagens termográficas dos concretos



Fonte: Autora

Figura 29: Imagens dos concretos sem termografia



Fonte: Autora

Devido ao fato de as fotos terem sido tiradas em momentos, ângulos e condições ambientais diferentes, o que deve ser efetivamente analisado é a diferença de tonalidade de cor entre os corpos-de-prova de mesmo cimento.

Dessa maneira, através das imagens, percebe-se que o cristalizante reduziu a altura da absorção de água para os concretos com os dois tipos de cimento. Porém, no corpo de prova com cimento CPIII, o cristalizante apresentou uma maior eficiência, o que é comprovado pelo fato da tonalidade de azul do concreto CCPIII-C ser mais branda que a do CCPIII-S.

Já com os concretos com CP V, essa diferença de tonalidade quase não pode ser notada. Portanto, conclui-se que o cristalizante foi mais eficiente com o com CP III, o que está de acordo com os demais resultados apresentados até aqui, para a idade de 28 dias.

4.3 Resumo dos resultados obtidos

O desenvolvimento teórico e prático deste trabalho acerca da avaliação das influências do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto fresco e endurecido possibilitou a formulação do Quadro 19, que exhibe o resumo dos resultados obtidos com os ensaios.

Quadro 19: Quadro resumo dos resultados

DADOS		CCPIII-S	CCPIII-C	CCPV-S	CCPV-C	
Parâmetros de traço	a/c	0,57		0,61		
	α (%)	8,4		9,0		
	A (%)	52,5		52,5		
Ensaio no estado fresco	Slump (cm)	11,5	9	7,2	6	
	Tempo de início de pega (h)	10:18	12:40	07:05	12:40	
Ensaio no estado endurecido	Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	23,6	24,9	29,1	31,7
		7 dias	32,5	38,9	32,1	34,9
		28 dias	41,1	44,7	36	39,5
	Resistência à tração (Mpa)	3 dias	2,2	3,1	2,5	3,5
		7 dias	3,7	3,1	3,2	3,1
		28 dias	3,6	4,7	3,1	4,2
	Absorção (%)		5,73	5,28	5,98	6,28
	Índice de vazios (%)		13,13	12,09	13,48	14,13
	Permeabilidade com cachimbo após 24h (mL)		1,40	0,32	1,07	0,58

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Analisando os resultados obtidos, pode-se chegar a algumas conclusões, as quais são listadas a seguir:

- O aditivo cristalizante, quando adicionado ao concreto, promove um aumento na consistência, o que é mostrado com a redução do *slump test*. Esse fato pode prejudicar as etapas de lançamento e adensamento do mesmo em obra
- O cristalizante provocou um aumento no tempo de início de pega dos concretos. Porém, o concreto com o CP V apresentou um retardo maior, contudo o tempo de pega dos concretos com cristalizante foi o mesmo;
- O cristalizante, apesar de não ser o seu objetivo, aumenta a resistência tanto à tração quanto à compressão do concreto, quando adicionado ao concreto;
- A presença do aditivo cristalizante apresentou redução na porosidade e na absorção de água quando imersos somente quando utilizado o cimento CPIII, para a idade avaliada que foi de 28 dias;
- Portanto, os concretos com cimento CPIII e aditivo cristalizante terão uma maior vida útil, devido a menor permeabilidade;
- Com o teste do cachimbo, foi comprovado que o aditivo cristalizante reduziu a permeabilidade do CCPIII com mais eficiência que do CCPV;
- As imagens termográficas permitiram visualizar que o concreto com CPIII é mais impermeável que o com CPV e que a presença do cristalizante contribui com a redução da absorção;
- Portanto, conclui-se que o cristalizante reagiu melhor no concreto com cimento CP III;
- A única propriedade que foi prejudicada no caso do cimento CPIII foi a consistência. Deste modo, recomenda-se que quando ele for utilizado em obra, seja solicitado um concreto com um abatimento um pouco maior, para evitar transtornos como entupimento de bombas e dificuldade de adensamento;

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

A seguir, serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros, a fim de dar continuidade ao tema abordado neste trabalho e aprofundá-lo.

- Avaliar também o cimento CP IV, pois é considerado o mais impermeável entre os tipos de cimento existentes no Brasil;
- Estudar a compatibilidade química entre o aditivo cristalizante e os diferentes tipos de aditivo plastificante utilizados;
- Determinar se a utilização de uma maior quantidade de aditivo cristalizante no concreto num valor além do recomendado pelo fabricante incrementa as qualidades do material;
- Realizar estudo comparativo dos diferentes cristalizantes disponíveis no mercado e a sua eficiência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5732**, Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991

_____, **NBR 5733**, Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____, **NBR 5735**, Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____, **NBR 5738**, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____, **NBR 5739**, Concreto – Ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____, **NBR 6118**, Projeto e estruturas de concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.

_____, **NBR 7215**, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____, **NBR 7222**, Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____, **NBR 8953**, Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2011.

_____, **NBR 9776**, Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____, **NBR 9778**, Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____, **NBR 11768**, Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

_____, **NBR 11579**, Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____, **NBR NM 9**, Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003.

_____, **NBR NM 43**, Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

_____, **NBR NM 65**, Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____, **NBR NM 67**, Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____, **NBR NM 248**, Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A.; **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, Editora Universidade Rural, 2000.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: Isaia G. C. (Ed) – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, 2011. Cap. 06.

BRUNAUER; COPELAND. *Scientific American Magazine*, 1964.

FERRARIS, C. F. **Measurement of rheological properties of high performance concrete: stateofart report**. NISTIR 5869, 1996.

GOMES, A. M.; AGUIAR, J. E.; NETO, H. A.; COSTA, J. O. **Permeabilidade do concreto: um estudo para a avaliação “in situ” usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais**.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia** – Volume I. 1ª Ed. São Paulo, 2011. Cap. 09.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. O Cimento Portland. In: Isaia, G. C. (Ed) – **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações**. 1 ed. São Paulo – Smart System Consulting, 2005. Cap. 10.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de Concreto Armado**. 2004. Cap. 02

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais** – 1ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais** – 2ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NETO, C. S. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: Isaia G. C. (Ed) – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo, 2011. Cap. 07.

OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C. **Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto**. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, Salvador, Brasil, 2008.

ROCHA, H. S. C.; **Metodologia de Registro de Imagens Termográficas para Equipamentos Elétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Minas Gerais, 2006.

TAKAGI, E. M.; JÚNIOR, W. A.; OLIVEIRA, F. S. **Tratamento Químico Cristalizante para Impermeabilização e Proteção de Estruturas de Concreto Armado**. In: 46 Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, Florianópolis, Brasil, 2004.